

METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL NIVEL DEL RIESGO AL CUAL SON SOMETIDOS LOS SISTEMAS DE MEDIA TENSIÓN.

Luis Felipe Salguero Isaza

Pereira, 1 de febrero de 2017
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica



METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL NIVEL DEL RIESGO AL CUAL SON
SOMETIDOS LOS SISTEMAS DE MEDIA TENSIÓN.

Luis Felipe Salguero Isaza

Proyecto presentado para optar por el título en
Ingeniería Eléctrica

Director

Jorge Humberto Sanz Alzate

Pereira, 1 de febrero de 2017
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica



AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros carlos chica, Fernando valencia por su colaboración y sus aportes, los cuales jugaron un papel importante en la culminación del documento

Al ingeniero Jorge Humberto Zans quien me acompañó en el desarrollo y culminación del documento, compartiendo sus conocimientos y experiencias.

Indice General

Objetivos.....	7
Objetivo Especifico.....	7
Objetivo General.....	8
Resumen.....	8
Definiciones	
1. Introduccion.....	11
2. Parámetros del rayo.....	12
2.1 incidencia de un rayo	13
2.2 Características eléctricas de los rayos	17
3. Desempeño de las líneas aéreas de distribución frente a descargas atmosféricas	22
3.1 Sobretensiones por rayos directos a conductores de fase no protegidos.....	22
3.2 Sobretensiones por rayos a objetos cercanos a la línea.....	22
3.3 nivel de aislamiento de la línea de distribución.....	30
3.4 CFO de tensión de aislamiento combinado.....	31
3.5 Determinación de tensión de CFO en estructuras con serie de aislamiento	32
3.6 Consideraciones prácticas al aumentar el CFO de la estructura	35
3.7 Capacidad de extinción de arco de la madera	37
3.8 Daños en la madera causados por rayos	38
3.9 Límites para aumentar la fuerza de aislamiento para mejorar la actuación del rayo	39
4. OHGW protección de líneas de distribución	41
4.1 Angulo de apantallamiento	42
4.2 Efecto del nivel de puesta a tierra y el aislamiento	43
4.3 Líneas doble circuito en distribución	43
4.4 Cables de tierra y pararrayos	43
5. Protección pararrayos de líneas de distribución	45
5.1 Consideraciones de longitud de cable de pararrayos.....	45

5.2 Descargas destructivas a partir de descargas cercanas	46
5.3 descargas destructivas a partir de descargas directas.....	46
6. Protección subterránea en las líneas de distribución	49
6.1 Daño por descarga directa a cables subterráneos	50
6.2 Corrientes y voltajes inducidos en los cables subterráneos	50
Anexo A	51

Índice de Tablas

-Tabla 1 - Recomendaciones para los parámetros de corriente de rayo (Grupo de Trabajo CIGRÉ 33.01[B27]).....	20
-Tabla 2.a –Tensión crítica de flameo primaria.....	33
-Tabla 2.b –tensión crítica de flameo primaria y CFO agregado Componentes.....	34
-Tabla 3- Clasificación de los pararrayos para el sistema de distribución.....	47
-Tabla A.1 Cálculos de CFO para varios caminos posibles de descarga disruptiva para el diseño de postes de 13.2 kV en la figura A.1.....	51
-Tabla A.2- CFOs de aislamiento para la línea de 33 kV en la figura A.2.....	54

Índice de Tablas

-Ecuación 1. Densidad de descargas a tierra	13
-Ecuación 2. Densidad de descargas a tierra	13
-Ecuacion 3. Distribución estadística normal logarítmica.....	19
-Ecuacion 4. Probabilidad de que la primera descarga de retorno tenga una corriente pico I_0 que exceda i_0	20
-Ecuación 5. Probabilidad de producir una descarga de retorno subsecuente con una corriente pico I_0 que exceda i_0	21
-Ecuacion 6. Tasa de recolección de descargas	22
-Ecuacion 7. Número de rayos recibidos por la línea protegida por un solo lado	23
-Ecuacion 8. Número de rayos recibidos por la línea protegida por ambos lados	24
-Ecuacion 9. Impedancia característica	25
-Ecuación 10. Nivel efectivo para ser utilizado en el cálculo de Z_0	26
-Ecuación 11. Sobretensión máxima del lugar más cercano a la descarga.....	27
-Ecuacion 12. Tensión CFO total calculada por dos componentes	33
-Ecuación 13. Tensión CFO total calculado por tres o mas componentes	34
-Ecuacion 14. CFO adicional adicionado	34

Objetivos

Objetivo General:

- Implementar un estándar capaz de evaluar el nivel del riesgo en las líneas de media tensión frente a fallas causadas por descargas atmosféricas.

Objetivos Especificos:

- Analizar los diferentes niveles de densidad de descargas a tierra presentes en el sistema eléctrico colombiano.
- Aplicar la norma "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines" al sistema eléctrico Colombiano para redes de media tensión.
- Analizar las variables físicas requeridas para el desarrollo del diseño
- Documentar un estándar capaz de evaluar el nivel del riesgo al cual será sometido el sistema.

Resumen

Las descargas atmosféricas sobre las líneas de distribución y transmisión son las causantes de diversas fallas en el sistema eléctrico, algunas de estas pueden causar interrupciones momentáneas o en algunos casos permanentes, generando a su vez problemas en la calidad del servicio prestado.

En la actualidad, el rayo es la principal causa de interrupciones no programadas en el suministro de energía. Datos estadísticos muestran que entre el 5 y 10 por ciento de las descargas atmosféricas que actúan sobre el sistema pueden generar interrupciones permanentes y causar grandes daños a la red, por otra parte las fallas temporales también pueden convertirse en fallas de tipo permanente, esto sucede si la falla es clarificada por dispositivos de una sola actuación como lo es el fusible.

Las descargas atmosféricas son un factor ambiental que incide sobre el diseño de las redes eléctricas; por ende, es de gran importancia tener en cuenta todas aquellas normas que existen para el manejo este fenómeno y así garantizar un diseño óptimo y seguro. Por esta razón nace la necesidad de aplicar un estándar al sistema eléctrico colombiano, el cual permita al diseñador realizar un estudio del nivel de riesgo contra descargas atmosféricas en la elaboración de un proyecto eléctrico.

Definiciones

Para los propósitos de este documento, se aplican los siguientes términos y definiciones. El diccionario estándar del IEEE: Glosario de Términos y Definiciones debe ser consultado para los términos no definidos en esta cláusula.

-Aislador: Elemento aislante, posiblemente con forma alargada y orificios transversales o ranuras, con el fin de aislar dos secciones de un cable o proporcionar aislamiento entre la estructura y el anclaje y también para proporcionar protección en caso de cables rotos.

-Cable de Guarda (OHGW): Cable puesto a tierra, colocado por encima conductores de fase con el fin de interceptar golpes directos y proteger los conductores de fase.

-Conductor blindado: Cable de puesta a tierra colocado cerca de los conductores de fase con el propósito de:

a) disminuir la incidencia de golpes de rayo directos a conductores de fase, b) La reducción de las tensiones inducidas a partir de los campos electromagnéticos externos, c) reducción de la impedancia del cable de tierra aéreo (OHGW) del sistema o d) El aumento de la impedancia mutua de un sistema OHGW a los conductores de fase protegidas. Un neutro a tierra debajo de un conductor de fase, las funciones de un cable blindado (funciones b, c, d), pero no como un OHGW (función a).

-Descargador: Cualquier espacio pequeño de aire entre dos conductores aislados eléctricamente o de forma remota conectada eléctricamente entre sí.

-Descarga directa: Descarga directa a cualquier parte de una red o de la instalación eléctrica.

-Descarga nube tierra: Descarga del rayo a tierra consistente en una primera descarga directa que puede ser seguida de descargas posteriores y otras corrientes impulsivas o continuas.

-Densidad de descargas a tierra (GFD) (Ng): Número medio de relámpagos por unidad de área por unidad de tiempo en un lugar determinado.

-Desempeño de una línea ante descargas atmosféricas: Se expresa como el número anual de descargas disruptivas por kilómetro.

-Descargador de sobretensión de óxido metálico: Esenciales para la coordinación del aislamiento en sistemas eléctricos de potencia. Equipos altamente valiosos pueden ser protegidos contra rayos y sobretensiones de maniobras.

-Descarga cercana: Descarga de un relámpago que no termina en cualquier parte de una red pero induce una sobretensión importante en él.

-Descarga subsecuente del rayo: Descarga de relámpago que puede seguir un camino ya establecido por una primera descarga.

-Electrodo de tierra: Conductor o grupo de conductores en contacto con el suelo con el fin de proporcionar una conexión con el suelo.

-Flameo (general): Descarga disruptiva a través del aire alrededor o sobre la superficie del aislamiento sólido o líquido, entre las partes de diferente potencial o polaridad, producida por la aplicación de tensión en el que la trayectoria de ruptura se ioniza lo suficiente para mantener un arco eléctrico.

-Flameo inverso: Descarga disruptiva del aislamiento resultante de una descarga a una parte de una red o instalación eléctrica que normalmente está potencialmente puesta a tierra.

-Interrupción a causa de un rayo: Corte de energía después de una descarga disruptiva que da lugar a la corriente de falla del sistema, debido a un dispositivo de conmutación para despejar el fallo.

-Línea de distribución: Líneas de energía eléctrica que distribuyen la energía de una subestación, siendo la fuente principal para los consumidores, por lo general a una tensión de 34,5 kV o menos, pero, posiblemente, a una tensión de fase a fase de hasta 69 kV.

-Nivel básico de aislamiento para impulso de rayo (BIL) (descargadores de sobretensión): Valor de cresta de un impulso de rayo para la que el aislamiento presenta una probabilidad del 90% de soportar (o una probabilidad de 10% de fallo) en condiciones determinadas.

- Tensión crítica de flameo (VCF o CFO) (aisladores): Valor de tensión al cual se tiene una probabilidad de flameo del 50% y los valores usados para diseño corresponden a los niveles básicos de aislamiento (BIL).

-Primera descarga de retorno del rayo: Descarga de relámpago al suelo cuando se inicia cuando la punta de un líder escalonado hacia abajo se encuentra con un líder ascendente de la tierra.

-Rayo: Descarga eléctrica entre dos nubes cargadas de electricidad estática o entre nube y tierra que se ve en forma de ráfaga de luz viva y momentánea.

-Rayo directo: Rayo con una o más descargas de retorno de terminación directa en cualquier parte de una red o de una instalación eléctrica.

-Templete: Cable trenzado usado para soporte de tensión semi-flexible entre un poste o estructura y la varilla de anclaje, o entre estructuras.

-Tensión inducida (impacto de rayo): Tensión inducida en una red o instalación eléctrica por una descarga atmosférica en las inmediaciones de esta.

1. Introducción

El sistema eléctrico colombiano actualmente se encuentra regido bajo ciertas normas, las cuales permiten un óptimo desempeño y a su vez velan por la seguridad de las personas y el medio ambiente. El correcto uso de estas puede garantizar un óptimo diseño y una apropiada implementación de cualquier instalación eléctrica que se desee realizar.

El diseño de las instalaciones eléctricas juega un papel importante en el desempeño de la red, en estos casos la experiencia y el uso adecuado de las normas permiten obtener sistemas capaces de soportar las adversidades, en el caso del estudio del nivel de riesgo por rayos conlleva al análisis de diversas variables físicas, además de la densidad de descarga a tierra en la zona de interés, estas permitirían realizar estimaciones sobre el número de fallas causadas por descargas atmosféricas, además de ubicar en un estándar el nivel de riesgo de descargas atmosféricas a las cuales se someterá el sistema y de esta manera facilitar el diseño de la red propuesta por los diseñadores a cargo.

2. Parámetros del rayo

2.1 incidencia de un rayo

Los rayos ocurren durante las tormentas, tormentas de nieve y otros fenómenos naturales. Sin embargo, en la mayoría de las áreas, las tormentas de lluvia son la principal fuente de rayos. Las tormentas producen relámpagos internos, de nube a nube y nube a tierra. El relámpago interno es el rayo más frecuente, pero la descarga nube-tierra afecta a las líneas aéreas de distribución. Durante una tormenta, las interrupciones de energía son causadas por el viento y los rayos. Las interrupciones causadas por el viento, los árboles, y el equipo dañado en algunas ocasiones son asumidas como fallas causadas por rayos, lo que hace que el número de interrupciones causadas por rayos parezca alto.

La fiabilidad de una línea de distribución depende de su exposición a los rayos. Para determinar la exposición, el diseñador de la línea de distribución necesita saber la densidad de descargas a tierra (GFD), que se define como el número de rayos por unidad de área por unidad de tiempo. La medida preferida del GFD es N_g , el número de descargas de nube a tierra por kilómetro cuadrado por año. Este GFD se puede estimar de varias maneras, como sigue a continuación.

2.1.1 Consideraciones estadísticas

Los rayos y los índices de interrupción causados por rayos tienen una considerable variación de un año a otro, ver Darveniza [B37], MacGorman et al. [B69]. La desviación estándar histórica para mediciones anuales de actividad de rayos varía de 20 % a 50 % de la media. Las estimaciones de GFD para una pequeña región tal como 10 km x 10 km tienen una desviación estándar mayor de aproximadamente 30 % a 50 % de la media. Regiones más grandes, de 500 km x 500 km tienen una desviación estándar menor de 20 % a 25 % de la media. En las zonas con menores niveles de actividad de rayo, la desviación estándar relativa es mayor

Con grandes desviaciones, lleva muchos años de datos estimar un valor medio con precisión. Esto es especialmente cierto cuando se utilizan datos de rayo-tierra para localizar una región o estimar un índice de interrupciones causados por rayos en una línea de distribución.

Las estimaciones de la media GFD también se pueden obtener directamente de los datos de la red de detección de relámpago o de contadores de destellos de relámpagos. Si suficientes años de datos están presentes, esto tiene la ventaja de identificar las variaciones regionales. El tamaño mínimo de la red que proporciona al menos 400 registros en cada lugar en el período de observación seleccionado se utiliza para permitir una comparación significativa de las áreas adyacentes.

2.1.2 Densidad de descargas a tierra a partir de datos de truenos

La densidad de descargas a tierra (N_g) para las zonas templadas puede estimarse a partir de T_d , el nivel ceraúnico, utilizando la ecuación (1) a partir de Anderson et al. [B6]:

$$N_g = 0,0017T_d^{1,56} \quad (1)$$

Donde:

N_g es la densidad de descargas a tierra de rayos por km^2 por año

T_d es el número de días al año con truenos

2.1.3 Densidad de descargas a tierra provenientes de la observación óptica de la densidad transitoria del rayo

En la mayoría de las áreas del mundo, una indicación de la actividad de un rayo puede ser obtenida a partir de observaciones ópticas de los rayos transitorios, ver Christian et al. [B24]. Los sensores basados en satélites responden a todo tipo de rayos con una cobertura relativamente uniforme en todas las áreas. Con un buen promedio, los datos de densidad óptica transitoria en la Figura 1 proporcionan mejores estimaciones de la densidad de descargas a tierra que la observación del rayo, tienen una amplia gama de relaciones entre densidad de descargas a tierra y las tormentas eléctricas por horas o días. También hay variaciones regionales en proporción a descargas a tierra, consulte Boccippio et al [B14], pero un valor medio de 0,33 descargas a tierra para el total de descargas se recomienda tanto para las regiones tropicales como para las templadas.

Para las áreas que carecen de sistemas de localización de descargas a tierra o contador de rayos, la estimación de la densidad de descargas a tierra recomendadas es:

$$N_g = \frac{N_t}{3} \quad (2)$$

Donde

N_g es la densidad de descargas a tierra en rayos por km^2 por año

N_t es la densidad total (nube + tierra) de rayos observados por km^2 por año obtenido a partir de la figura 1 a Figura 3.

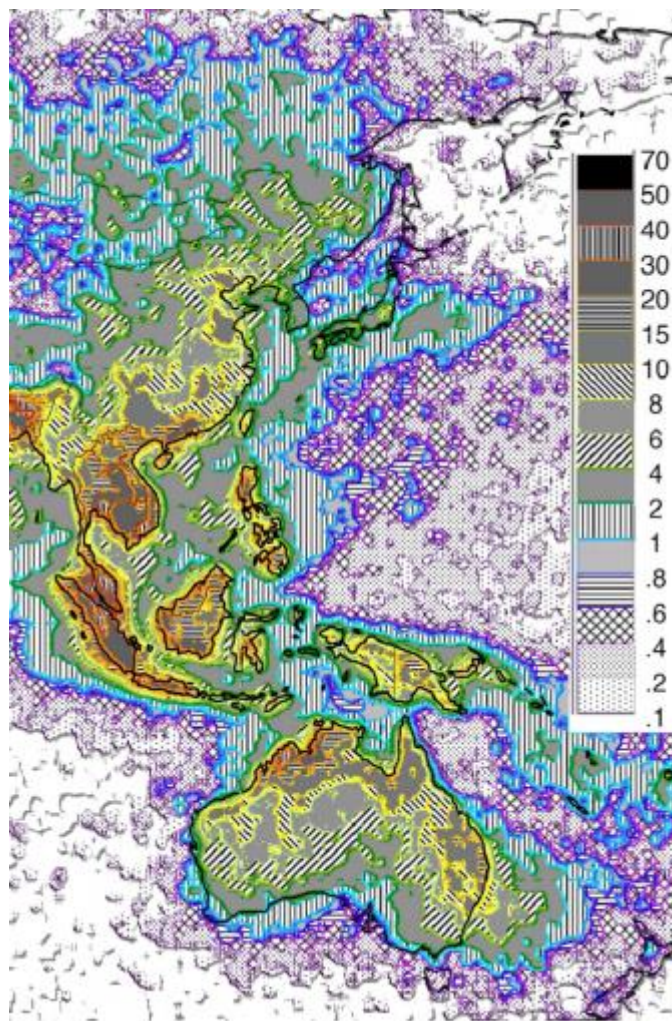


Figura 1a - total actividad de rayos (nube + tierra) (N_t , rayos observados por $\text{km}^2 \text{año}^{-1}$) para Asia y Australia, adaptado de Christian et al. [B24]

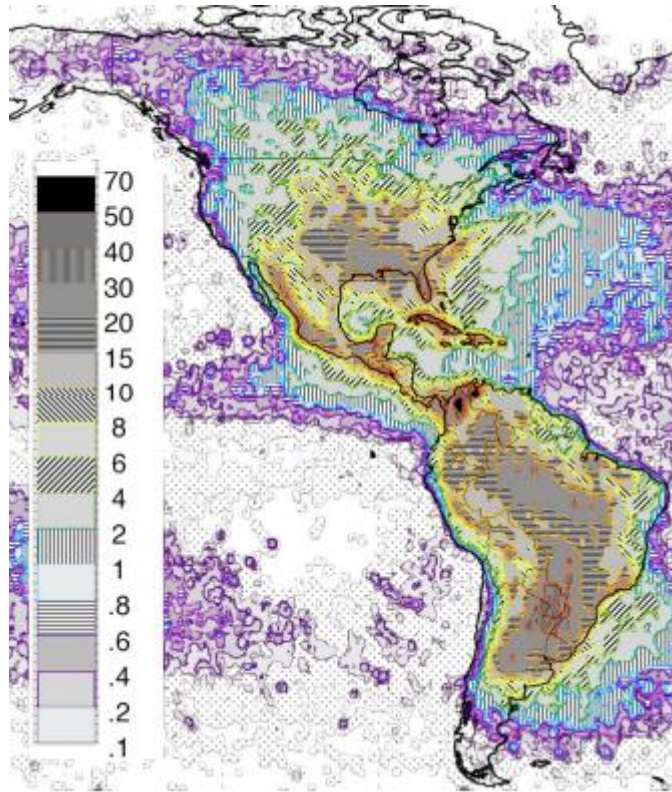


Figura 1b - total actividad de rayos (nube + tierra) (N_t , rayos observados por $\text{km}^2 \text{ año}^{-1}$) para América del Norte y del Sur, adaptado de Christian et al. [B24]

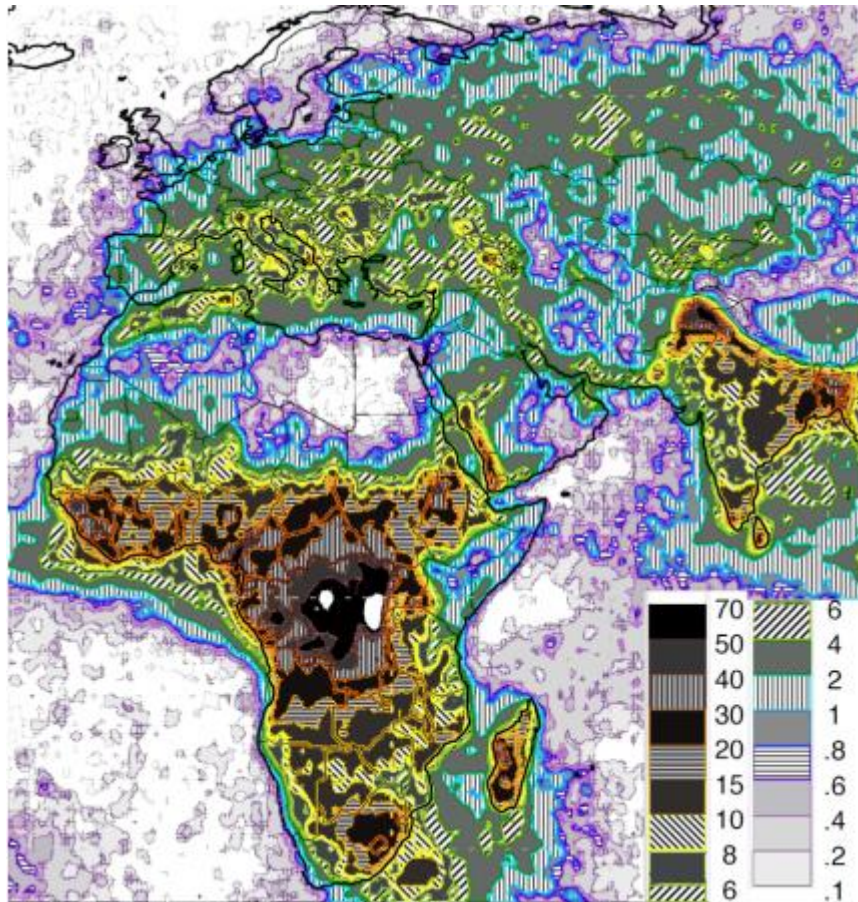


Figura 1c - total actividad de rayos (nube + tierra) (N_t , rayos observados por $\text{km}^2 \text{ año}^{-1}$) para África y Europa, adaptado de Christian et al. [B24]

2.1.4 Densidad de descargas a tierra provenientes de redes de localización de rayos

Una descripción más detallada de la actividad de rayos puede ser obtenida de los mapas de densidad de descargas a tierra (GFD), que se crean a partir de la información obtenida a través de redes de detección de rayos actuales o redes contadoras de rayos que se han operado en el pasado.

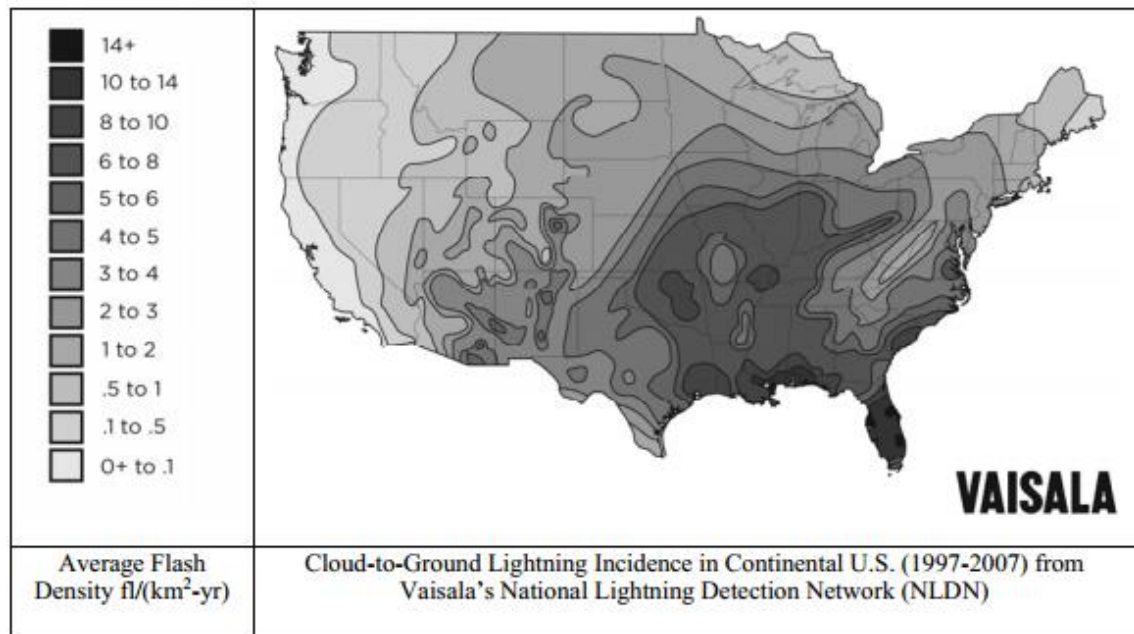


Figura 2 - Mapa de densidad de descargas a tierra (GFD) de EE.UU. contiguos (reimpreso con el permiso de Vaisala) [B78]

Las redes de localización de rayos y las matrices contadoras de rayos se han desplegado en Norteamérica y otras partes del mundo. Con suficiente experiencia, estas redes proporcionan la densidad de descargas a tierra (GFD) con mapas detallados, con mucho mayor detalle y precisión que ha estado disponible. Los sistemas de localización también proporcionan cantidades de medidas que son más útiles y detallados que los datos cerámicos. Además de proporcionar el GFD, las redes de localización de rayos también pueden proporcionar la fecha, hora, lugar, número de golpes, polaridad, pico Campo de radiación electromagnética y la estimación correspondiente de la corriente de pico de un golpe.

En muchas áreas del mundo, estos sistemas han acumulado datos suficientes para satisfacer los propósitos de diseño en zonas de cuadrícula en forma fina de hasta 20 km x 20 km. Mapas de GFD actualmente se utilizan para el diseño de líneas de distribución, la estimación de descargas disruptivas causados por rayos, y muchos otros tipos de análisis de un rayo.

2.2 Características eléctricas de los rayos

2.2.1 parámetros de la forma de onda

La corriente de sobretensión se considera como una fuente de corriente. Rayos directos a conductores no protegidos causan sobretensiones que tienen la misma forma de onda que la corriente de descarga. Figura 3 describe la forma de onda de corriente típica de un rayo cóncavo con el uso de los parámetros mencionados.

Parámetro en la Figura 3	Descripción
I_{10}	10% de intersección a lo largo de la forma de onda de la corriente de descarga
I_{30}	30% de intersección a lo largo de la forma de onda de la corriente de descarga
I_{90}	90% de intersección a lo largo de la forma de onda de la corriente de descarga
$I_{100} = I$	pico inicial de la corriente
I_F	pico final de la corriente
$T_{10/90}$	tiempo de intersección entre I_{10} y I_{90} en el frente de onda
$T_{30/90}$	tiempo de intersección entre I_{30} y I_{90} en el frente de onda
S_{10}	tasa instantánea de aumento de corriente en I_{10}
$S_{10/90}$	Pendiente promedio (a través de intercepciones I_{10} y I_{90})
$S_{30/90}$	pendiente promedio (a través de intercepciones I_{30} y I_{90})
S_m	tasa de aumento máximo de corriente a lo largo del frente de onda, por lo general en I_{90}
$td_{10/90}$	equivalente lineal de la duración del frente de onda derivada del $I_F / S_{10/90}$
$td_{30/90}$	equivalente lineal de la duración del frente de onda derivada del $I_F / S_{30/90}$
t_m	equivalente lineal de la duración del frente de onda derivada del I_F / S_m
Q_I	carga de impulso (tiempo integral de la corriente) en la forma de onda de la corriente de descarga

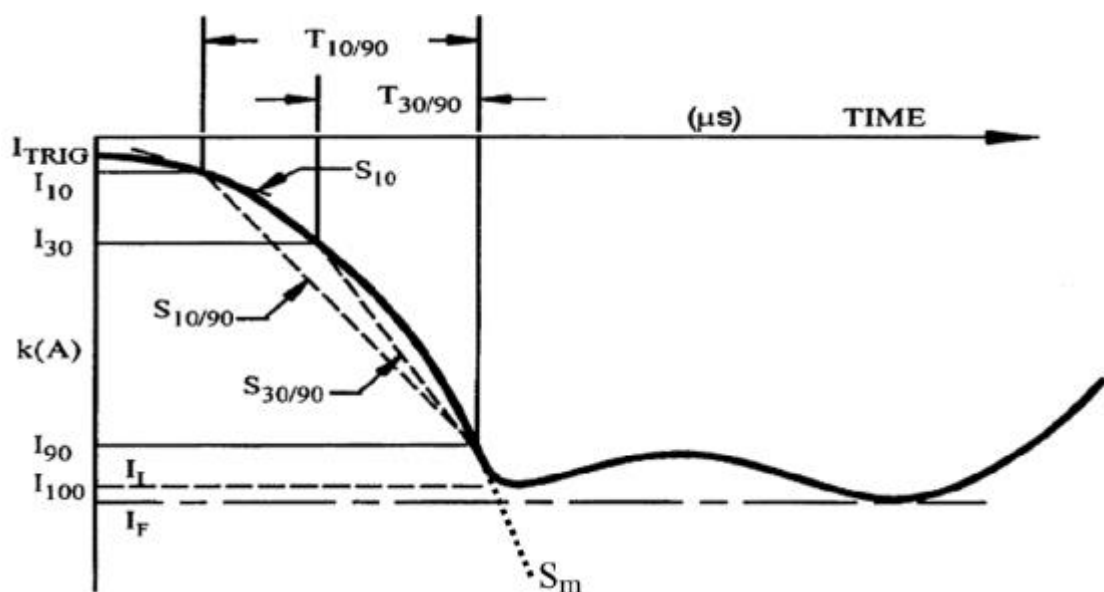


Figura 3- Descripción de los parámetros y la forma de onda de corriente de rayo [B27]

Desde un punto de vista de circuito simplificado, las sobretensiones por rayos cercanos están acoplados inductivamente a la forma de onda actual. Esto significa que la magnitud de la sobretensión pico se relaciona con la inclinación máxima de S_m y la duración de la sobretensión se relaciona con T_{10-90} .

2.2.2 distribución estadística normal logarítmica

Desde el amplio resumen presentado por el Grupo de Trabajo CIGRE 33.01 [B27] se complementó con las observaciones de las líneas de transmisión en Japón por Takami y Okabe [B110], se asumen las distribuciones logarítmica normales de parámetros del rayo. La ecuación general para la función de densidad de probabilidad logarítmica normal para cualquier parámetro particular x está dada por La ecuación (3):

$$f(x) = \frac{1}{\beta \cdot x \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

$$z = \frac{\ln(x/M)}{\beta}$$
(3)

Donde:

$f(x)$ es la densidad de probabilidad

M es el valor medio de x

β es la desviación estándar logarítmica (en base e)

2.2.3 Parámetros de descargas negativas descendentes

Los rayos consisten en una primera descarga y pueden tener uno o más descargas posteriores, siguiendo el mismo camino y terminando en el mismo lugar de la línea. Las primeras descargas tienen picos de corriente más altas y las descargas posteriores tienen mayor velocidad de subida de corriente como se muestra en la Tabla 1.

Los valores de M y β de la ecuación (3) para los parámetros del rayo más relevantes utilizados en el cálculo de las tasas de interrupción de la línea de distribución se presentan en la Tabla 1, basado en Grupo de Trabajo CIGRE 33.01 [B27].

Tabla 1 - Recomendaciones para los parámetros de corriente de rayo (Grupo de Trabajo CIGRÉ 33.01[B27])

Parametro	Primera descarga		Descarga subsecuente	
	M, Media	β, Desviación estándar logarítmica	M, Media	β, Desviación estándar logarítmica
TIEMPO FRONTAL (μs)				
$t_{d10/90} = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_{d30/90} = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553	0.67	1.013
$t_m = I_F / S_m$	1.28	0.611	0.308	0.708
PENDIENTE (kA/μs)				
S_m , Maximo	24.3	0.599	39.9	0.852
S_{10} , at 10%	2.6	0.921	18.9	1.404
$S_{10/90}$, 10-90%	5.0	0.645	15.4	0.944
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
CRESTA DE CORRIENTE (kA)				
I_i , inicial	27.7	0.461	11.8	0.530
I_F , final	31.1	0.484	12.3	0.530
Ratio, I_i/I_F	0.9	0.230	0.9	0.207
OTROS PARAMETROS RELEVANTES				
Tiempo medio de cola t_n (μs)	77.5	0.577	30.2	0.933
Numero de descargas por rayo	1	0	2.4	0.96 basado en la media $N_{total}=3.4$
Carga electrica de una descarga Q_i (Coulomb)	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int I^2 dt$ ((kA) ² s)	0.057	1.373	0.0055	1.366
Intervalo entre descargas (ms)	—	—	35	1.066

En aras de la manipulación de la distribución probabilística de una manera simple, la siguiente expresión se adopta (Anderson [B4]) para la probabilidad de que el primer pico de la corriente de descarga de valor I_0 supere un valor i_0 :

$$P(I_0 > i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (4)$$

Dónde

$P(I_0 \geq i_0)$ es la probabilidad de que la primera descarga de retorno tenga una corriente pico I_0 que exceda i_0 .

i_0 es el pico de corriente de descarga de retorno probable (kA)

Cuando se utiliza la media del primer pico de la corriente de descarga de retorno de 31,1 kA de la Tabla 1 para i_0 en la ecuación (4), la probabilidad de que la corriente pico I_0 del rayo exceda la media es de aproximadamente 0,5. La ecuación (4) se aplica a los valores

de I_0 inferiores a 200 kA. Esto se encuentra actualmente bajo revisión por Borghetti et al. [B17] y [B20]. Mediciones recientes de la red de detección de rayos en América del Norte indican la posibilidad de valores inferiores de la corriente media, ver Cummins et al. [B35], que puede ser el resultado de errores de clasificación de descargas posteriores como primeras descargas en los sistemas remotos de medición. La distribución de los valores del subsecuente pico de corriente de descarga de retorno es aproximada por (IEEE Std 1243-1997):

$$P(I_0 > i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{12}\right)^{2.7}} \quad (5)$$

Dónde

$P(I_0 \geq i_0)$ es la probabilidad de producir una descarga de retorno subsecuente con una corriente pico I_0 que exceda i_0 .

i_0 es el pico corriente de descarga de retorno subsecuente probable (kA)

Cuando se utiliza la media de la corriente pico subsecuente a una descarga de 12,3 kA de la Tabla 1 es usada para i_0 en la ecuación (5), la probabilidad de que el pico de la corriente de descarga I_0 subsecuente supere la media es de aproximadamente 0,5.

Generalmente, las fallas de blindaje son causadas por rayos con una pequeña corriente de la primera descarga de retorno, correspondientes a pequeños pulsos a corta distancia [IEEE Std 1243-1997]. La probabilidad de que la primera corriente pico de la descarga sea menor a i_0 es $(1 - P(I_0 \geq i_0))$, utilizando la ecuación (4). Las débiles corrientes de la primera descarga son susceptibles a ser seguidas por uno o más descargas subsecuentes con corriente pico más alta, a partir de la ecuación (5). Esto significa que casi todos los fallos de blindaje dan lugar a descargas disruptivas de aislamiento, no importa cuán bajo sea el pico de corriente de la primera descarga o que tan pequeña que sea la distancia de ataque.

2.2.4 Amplitud y la dependencia de la frecuencia

Hay una alta correlación entre la inclinación máxima de S_m y la corriente de pico I_F en la Tabla 1, lo que significa que la misma forma de onda en la figura 3 se puede utilizar a pesar de que la amplitud pico de la corriente puede variar en un factor de 100: 1 a partir de 2 kA a 200 kA. Esta correlación puede ser explotada mediante el uso de la equivalente líneal de tiempo de 1,28 microsegundos para primeras descargas y 0,31 microsegundos para descargas posteriores para la evaluación del desempeño de la línea de distribución. Un equivalente lineal de tiempo de 2,0 μ s, usado en IEEE Std 1243-1997 es apropiado para los eventos de la primera descarga de gran amplitud que tienden a causar descargas destructivas en líneas de transmisión con altos niveles de resistencia de aislamiento y cable de guarda

Mientras el impulso de rayo tiene un contenido de frecuencia amplia, muchos métodos de cálculo para el acoplamiento electromagnético se basan en el análisis de dominio de la frecuencia. En casos en que se utiliza una sola frecuencia para las estimaciones, se obtendrá por la onda sinusoidal que da la misma amplitud pico I_F y la máxima derivada S_m . Para la primera descarga con media de 31,1 kA y 24,3 kA / μ s, la frecuencia es de 124 kHz.

Para descargas subsecuentes con valores promedios de 12,3 kA a 39,9 kA / μ s, la frecuencia es de 516 kHz.

3. Desempeño de las líneas aéreas de distribución frente a descargas atmosféricas

Los rayos pueden dar cuenta de muchas interrupciones de energía en las líneas de distribución. Los rayos pueden causar descargas disruptivas de:

- a) Rayo directo a la línea
- b) Tensiones inducidas por descargas cercanas

Cláusula 3 describe cómo estimar el número de descargas destructivas directas e inducidas en los circuitos de distribución

3.1 Sobreensiones por rayos directos a conductores de fase no protegidos

Los rayos directos a conductores de fase de distribución de energía sin protección causan descargas disruptivas de aislamiento en la gran mayoría de los casos. Por ejemplo, un golpe de tan poco como 10 kA produciría una sobreensión de alrededor de 2.000 kV, muy por encima de los niveles de aislamiento de las líneas de distribución aéreas que operan hasta 69 kV.

3.1.1 Incidencia del rayo y altura de la estructura

Los rayos pueden tener un efecto significativo sobre la fiabilidad de una línea, especialmente si los postes son más altos que el terreno circundante. Más rayos son recogidos por estructuras más altas. La tasa de recolección de rayos N , en campo abierto (no hay árboles significativos o edificio cercano), se calcula por la ecuación (6), véase Eriksson [B49]:

$$N = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (6)$$

Dónde

N es la tasa de recolección de descargas (rayos / 100 km / año)

N_g es la densidad de descargas a tierra de la ecuación (2) o en la Figura 2 (descargas por km² por año)

h es la altura del conductor más alto en el poste (m)

b es el ancho de la estructura (m)

Para la mayoría de las líneas de distribución, el factor de ancho b de la estructura es insignificante ($b \approx 0$) en comparación con la anchura atractiva

De la ecuación (6), si la altura del poste se incrementa en un 20%, la tasa de descargas en la línea de distribución aérea se incrementaría en un 12%. Además, expresando el radio atractivo de la línea como un ángulo de protección a nivel del suelo, este ángulo variaría de 77 a 82°.

3.1.2 interceptación de rayos por estructuras cercanas y árboles

La exposición de la línea de distribución a los rayos depende de la cantidad de estructuras adyacentes que sobresalgan por encima del terreno circundante. Estructuras situadas a lo largo de la parte superior de las montañas, cordilleras, o colinas serán objetivos más probables para los rayos que los protegidos por características naturales. Los árboles y los edificios también pueden desempeñar un papel importante en el desempeño de las líneas de distribución frente a descargas en terreno llano. Los árboles y los edificios pueden interceptar muchos rayos, que de otro modo golpearían la red.

Los objetos cercanos a una línea de distribución influyen directamente en el número de rayos directos sobre ella, tal influencia se expresa en un factor de blindaje, S_f se define como la porción por unidad de la línea de distribución blindada por objetos cercanos. El número de ataques a la línea es entonces:

$$N_s = N(1 - S_f) \quad (7)$$

Dónde

N_s es el número de rayos recibidos por la línea protegida (rayo / 100 km / año)

N es la tasa de recolección de descargas en la línea en terreno abierto de la ecuación (6) (rayo / 100 km / año)

S_f es el factor de protección del medio ambiente, que va de 0 a 1

Un factor de blindaje de $S_f = 0.0$ significa que la línea de distribución se encuentra en terreno abierto sin protección proporcionada por objetos cercanos. Un factor de $S_f = 1.0$ significa que la línea de distribución está completamente protegida de rayos directos. Como se explica en el apartado 3.2, sin embargo, esto no implica que la línea está protegida contra los efectos del rayo.

La figura 4 muestra un medio para aproximar los factores de protección para objetos de diferentes alturas para una línea de distribución de altura de 10 m. Los objetos se suponen en una fila uniforme paralela a la línea de distribución y situada en un lado de ella. Esto podría representar una fila continua de árboles o edificios paralelos a la línea de distribución

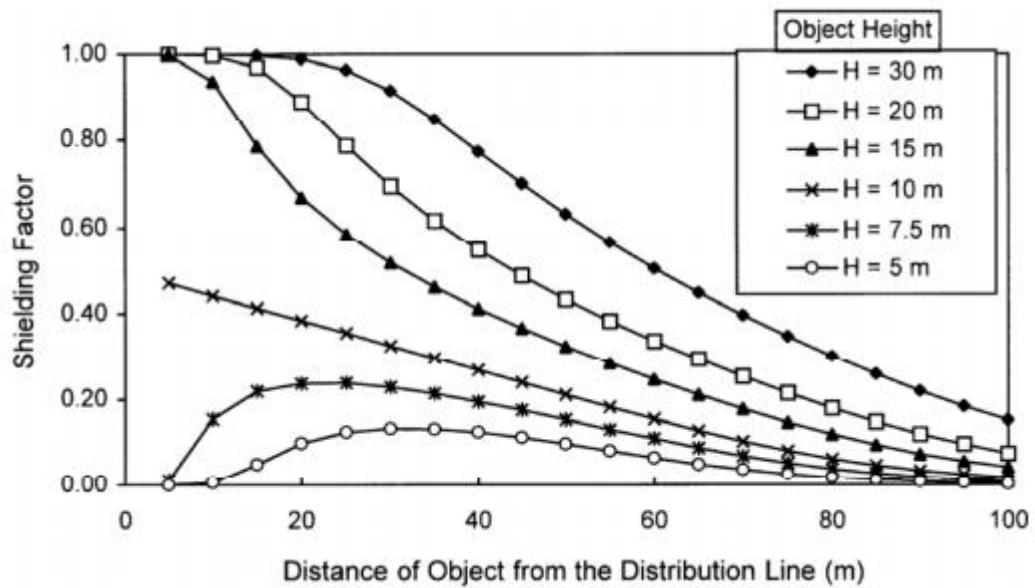


Figura 4 - Factores de blindaje S_f debido a los objetos cercanos de diferentes alturas para una línea de distribución de 10 m de altura

La Figura 4 de igual forma puede ser utilizada para objetos cercanos a ambos lados de la línea de distribución, si se suman los factores de protección de ambos lados: izquierdo y derecho (si la suma de los factores de blindaje es mayor a uno, entonces el total de los factores de protección es igual a uno). Como ejemplo, considere una línea de distribución aérea de altura de 10 m, con las siguientes hileras de edificios en cada lado:

- Una fila de edificios a 7,5 m de altura, a 30 m del lado izquierdo de la línea de distribución (S_f Izquierda = 0.23)
- Una fila de árboles a 15 m de altura, a 40 m de la parte derecha de la línea de distribución (S_f derecha = 0.4)

Si el GFD es 1 rayo / km^2 / año, el número de rayos directos a la línea de distribución aérea en campo abierto sería 11.15 rayos / 100 km / año a partir de la ecuación (6). Con las hileras de edificios y árboles, el número de rayos directos reduciría, como se muestra en la ecuación (8):

$$\begin{aligned}
 N_s &= N \left[1 - (S_{f_{\text{izquierda}}} + S_{f_{\text{derecha}}}) \right] \\
 &= (11.15 \text{ rayos}/100\text{Km}/\text{Año}) [1 - (0.23 + 0.4)] \\
 &= 4.12 \text{ rayos}/100\text{Km}/\text{Año}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Dónde

N_s es el número de rayos recibidos por la línea protegida (rayo / 100 km / año)

N es la tasa de recolección de rayos de la línea en terreno abierto, de la ecuación (6) (rayo / 100 km / año)

$S_{f_{\text{izquierda}}}$ y $S_{f_{\text{derecha}}}$ son los factores ambientales de blindaje de la figura 4 en cada lado de la línea

3.1.3 Descargas disruptivas provenientes de rayos directos

3.1.3.1 Tasa de descargas disruptivas de rayos directos en las fases sin protección

Tanto el efecto corona y los efectos imperfectos del suelo desempeñan papeles relativamente menores en la impedancia del conductor de fase, dando lugar a cambios menores al 30% de este valor. A menos que el aislamiento de la línea de distribución este protegido con un OHGW o descargadores, más del 99% de todos los rayos directos causarán descargas disruptivas en la línea de distribución, independientemente del nivel de aislamiento, separación del conductor o de la puesta a tierra. Por lo tanto, para estimar el número de descargas disruptivas debido a rayos directos, se debe usar la ecuación (6) para una línea de distribución en campo abierto, o la ecuación (7) y la ecuación (8) para una línea blindada parcialmente.

3.1.3.2 Baja frecuencia, baja corriente e impedancia característica del conductor de fase

La impedancia característica de una sola línea sobre el suelo, alimentado desde un extremo, se calcula con:

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{2000 \cdot h}{r} \right) \quad (9)$$

Dónde

Z_0 es la impedancia (Ω)

h es la altura del conductor sobre el suelo (m)

r es el radio del conductor (mm)

La impedancia característica de un conductor alimentado desde la mitad, tiene por valor un medio del total de esta y la corriente del rayo a su vez se dividirá en partes iguales en cada camino sobre la tierra. Un conductor de fase sin protección de radio $r = 10$ mm y una altura $h = 10$ m sobre una tierra perfecta, tendrá una impedancia en un extremo de 456 Ω o de 228 Ω en el caso de que un rayo directo termine en algún lugar de la línea. La baja corriente y el valor de la alta frecuencia sobre una tierra perfectamente conductora se altera según las condiciones de una alta corriente de rayo con un rápido ritmo de subida sobre el imperfecto suelo de conductividad finita.

3.1.3.3 Efectos corona en alta tensión

Utilizando la ecuación (4) para la primera corriente pico de un rayo con $i_0 = 4,4$ kA dará una probabilidad del 99% de que esta corriente sea excedida. Utilizando la ecuación (9) con $h = 10$ m y $r = 10$ mm, la impedancia característica Z_0 será de 456 Ω . Suponiendo que la corriente viaja en dos direcciones lejos de la fuente, la impedancia característica será $Z_0 / 2$ o 228 Ω . El producto de la corriente del primer rayo I_f y el conductor de fase aumenta la impedancia, sugiriendo una tensión pico que exceda 1 MV aproximadamente el 99% de las veces. Con esta magnitud de tensión en el conductor, su radio efectivo aumenta los efectos corona, incrementando de este modo la capacitancia del conductor y reduciendo su impedancia característica. IEEE Std 1243-1997 proporciona un método para la evaluación de este efecto.

Si el radio de la corona envuelve los conductores adyacentes, éstos tendrán casi la misma tensión que la fase afectada del acoplamiento de modo común y la tensión de modo diferencial, el aislamiento de fase a fase se reducirá aún más. Sin embargo, si la envolvente corona sobrepasa la separación de fase a fase o de fase a neutro, habrá una mayor probabilidad de que se genere una descarga disruptiva en las líneas de distribución. Descargas disruptivas de centro de vano sobre las líneas de distribución, se han observado con cámaras automáticas y también se documentan las localizaciones donde los conductores cubiertos han sido derretidos después de un fallo de flameo.

3.1.3.4 Efectos de una tierra imperfecta en alta frecuencia

La impedancia del conductor a través de un terreno "con pérdida" de la conductividad finita, aumentará a medida que disminuye la conductividad del suelo y haya una frecuencia decreciente. Para mayor precisión, la altura h en la ecuación (9) debe ser un número complejo, ver Gary [B51] y Darveniza [B43], basado tanto en la conductividad del suelo y la frecuencia. La impedancia sobre la amplia gama de frecuencias debe ser evaluada y una transformada inversa de Fourier se debe realizar para obtener un resultado de dominio del tiempo. Sin embargo, el efecto de la conductividad del suelo finito sobre la impedancia puede ser modelada con una precisión aceptable en los cálculos de rayos mediante la sustitución de la altura real de la línea h en la ecuación (9) con un valor real de la altura efectiva, ver Darveniza [B43], dada por :

$$h_{eff} = h + \frac{4.7}{\sqrt{\sigma}} \quad (10)$$

Dónde

h_{eff} es la altura efectiva para ser utilizada en el cálculo de Z_0 en la ecuación (9) (m)

h es la altura del conductor sobre el suelo (m)

σ es la conductividad del suelo uniforme, con pérdida debajo del conductor (mS/m)

Para obtener un resultado realista, la conductividad de la tierra en la frecuencia principal de interés, 124 kHz para el primer rayo, debe incluir los cambios dependientes de la frecuencia, tanto en la conductividad del suelo como en la permisividad. Estos efectos tienden a limitar la conductividad a 124 kHz a un mínimo de $\sigma \geq 1$ mS / m, incluso para las zonas de roca con muy baja conductividad.

3.1.3.5 Tasa de fallos apartir de rayos directos con extinción del arco en fases no protegidos

Al menos tres formas de extinción de arco son prácticos en las líneas de distribución: Serie de aislamiento de madera en el camino, los aisladores consisten en una serie de brechas y una resistencia de óxido metálico, y un camino largo para el rayo proporcionado por una descarga progresiva a través de un conductor cubierto o por otros medios. Si no se utiliza ninguno de los métodos de extinción de arco, un flameo de un rayo directo provocará un fallo en el circuito de distribución.

3.2 Sobretensiones por rayos a objetos cercanos a la línea

La experiencia y observaciones muestran que muchas de las interrupciones relacionadas con los rayos en las líneas de bajo aislamiento, se deben a un rayo que descarga al suelo o a estructuras en las proximidades de la línea. La mayoría de las tensiones inducidas en las líneas de distribución por rayos que terminan cerca de una línea son menores a 300 kV. Las tensiones inducidas tienden a tener una anchura de impulso corto en comparación con el tiempo del valor promedio de un ataque típico. Tienden a ser unipolar especialmente para descargas junto a la línea. Para una tierra con pérdidas, la forma de onda de tensión inducida depende de la posición a lo largo de la línea, la polaridad puede invertirse desde un extremo de la línea a la otra.

El ingeniero de sistemas de distribución puede llevar a cabo evaluaciones detalladas de las sobretensiones inducidas por un rayo, lo que requiere una considerable experiencia y habilidad técnica. Algunos sistemas de distribución pueden ser fácilmente equipados con contramedidas simples, tales como una resistencia de impulso considerablemente alta en cada estructura para soportar las sobretensiones inducidas más severas, asumiendo a su vez las condiciones locales del suelo. Cuando un nivel de sobretensión de 300 kV (CFO) se considera suficiente para las líneas en áreas de alta conductividad del suelo, un nivel de aislamiento de 420 kV (CFO) puede ser más apropiado para zonas de baja conductividad del suelo con $\sigma = 1 \text{ mS} / \text{m}$ (milisiemens / metro).

El cálculo preciso de las tensiones inducidas requiere la disponibilidad de modelos adecuados para el acoplamiento electromagnético entre el rayo y el pulso electromagnético (LEMP).

Una de las fórmulas analíticas mas sencillas para el cálculo de la magnitud pico de una sobretensión inducida fue establecida por Rusck [B100]. Este análisis se limita a una configuración simple, es decir, una línea catenaria infinitamente larga por encima de un terreno ideal, excitado por un LEMP generado por una forma de onda de corriente de rayo de paso con propagación a lo largo de un canal representado por un modelo de línea de transmisión, que se mueve a una velocidad lenta v con respecto a la velocidad de la luz C . La fórmula simplificada Rusck sirve como punto de referencia de calibración en métodos numéricos, pero ofrece resultados engañosos en muchos casos. Se predice que la sobretensión máxima es:

$$U_m = 30 \left(1 - \frac{v/c}{\sqrt{2 - (v/c)^2}} \right) \left(\frac{h \cdot I_p}{d} \right) \quad (11)$$

Dónde

U_m es la sobretensión máxima del lugar más cercano a la descarga (kV)

v es la velocidad de propagación de la descarga posterior (m / s), típicamente $c / 3$

c es la velocidad de la luz, $3 \times 10^8 \text{ m} / \text{s}$

I_p es la corriente pico de la descarga (kA)

h es la altura del conductor sobre el suelo (m)

d es la distancia lateral desde la línea horizontal a la terminación de la descarga vertical al suelo (m)

Una limitación en la fórmula Rusck simplificada, en relación con los imperfectos efectos del terreno, puede ser resuelto de manera eficiente con una exactitud razonable por un aumento artificial de la altura aparente de los conductores de fase sobre el suelo, utilizando la ecuación (10), ver Darveniza [B43].

Los rayos pueden ser recogidos por objetos altos, la altura y la distancia de los árboles, los edificios, las normas de energía y otras estructuras del sistema de distribución influirán en el comportamiento del rayo. Para las estructuras altas, la ecuación (11) falla porque $v = c$ en los conductores y el modelo Rusck no debe ser utilizado para este cálculo. Baba y Rakov [B8] aplican métodos numéricos para este problema y sugiere que las descargas a objetos altos como las turbinas eólicas, que se encuentran a unos 100 metros de las líneas de distribución, pueden inducir de un 50% a un 80% sobretensiones más alta que las descargas a tierra en la misma ubicación.

Modelos más elaborados, ver Nucci et al. [B79], [B80], [B81] y [B82], ahora permiten un tratamiento suficientemente preciso de configuraciones de líneas realistas. Por otra parte, la presencia de transformadores de distribución con los dispositivos pertinentes de protección contra sobretensiones, así como la presencia de descargadores de sobretensión, neutros a tierra y otros OHGWs a lo largo de la línea, También deben tenerse en cuenta para predecir la respuesta global de la línea de alcance de los campos electromagnéticos producidos por los rayos cercanos.

Los cálculos de voltajes inducidos deben llevarse a cabo de la siguiente forma:

- Una prospectiva ubicación de la descarga, se establecen magnitudes de la primera y la subsiguiente descarga pico, por ejemplo usando un método de Monte Carlo en combinación con la expresión de radio atractivo en la ecuación (6).
- La corriente del rayo donde entra en contacto con el suelo en la base del canal, se asume, por ejemplo utilizando la forma de onda de la figura 3 o una pendiente con tiempo de avance equivalente t_m de la tabla 1.
- Se selecciona un modelo de tiempos de descarga de retorno de rayo, que especifica la distribución espacial y temporal de la corriente por el canal, como en Nucci et al [B79]. Normalmente, el campo irradiado de esta corriente domina el campo electrostático o de inducción para los tiempos cortos de interés en el cálculo de sobretensiones inducidas, ver Uman et al [B111].
- La respuesta de los componentes del sistema de alimentación a los transitorios inducidos se calcula utilizando un programa de modelado basado en EMTP que incluye la posibilidad de calcular respuestas de línea a los campos electromagnéticos de excitación externa.
- El campo electromagnético asociado con la corriente se calcula en todas partes a lo largo de la línea, teniendo en cuenta si es necesario el efecto de la conductividad del suelo, véase Cooray [B34] y Rubinstein [B99]. Normalmente, el campo eléctrico se resuelve en sus componentes verticales y horizontales, pero otras combinaciones de las componentes de un campo son equivalentes ya que están todas relacionadas por las ecuaciones de Maxwell

- El cálculo se repite muchas veces con diferentes ubicaciones de rayos y magnitudes de descargas pico para simular un gran número de años de servicio.

- Los resultados de los cálculos se normalizan para la densidad de descargas a tierra de la zona.

Como para muchas otras aplicaciones en la práctica de los sistemas de potencia, los modelos requieren una implementación de códigos en ordenador, ya que, en general, requieren una integración numérica de las ecuaciones relevantes.

Todos los modelos pueden utilizarse para inferir en las curvas de actuación de un rayo que muestran el número de flameos/ 100 km/ año en comparación con el CFO de la línea de distribución.

La Figura 5 presenta la frecuencia de flameos en función de la tensión de descarga crítica (CFO) de 10 m de altura, línea infinitamente larga que consiste en un solo conductor por encima de un terreno conductor. Los valores están normalizados para un GFD de $N_g = 1$ Rayo / km^2 / año y se pueden escalar linealmente con respecto a el GFD.

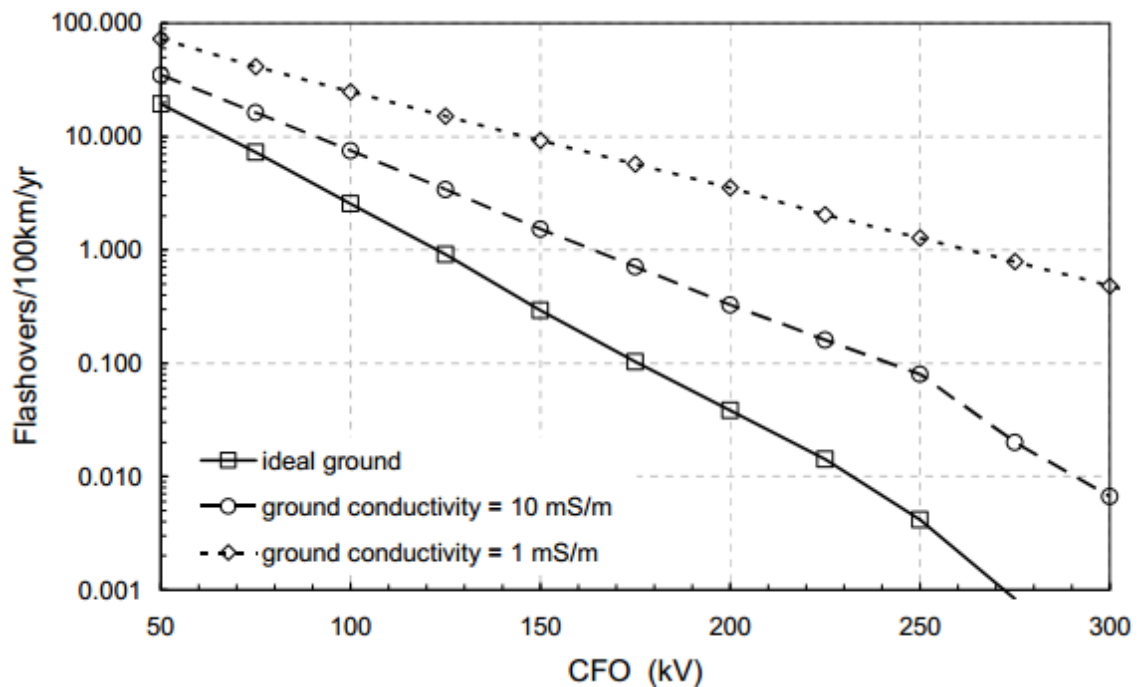


Figura 5 - Número de descargas disruptivas de tensión inducida en comparación con el nivel de aislamiento de línea de distribución, desde Borghetti et al. [B22]

NOTA- En la Figura 5 el terreno ideal tiene una conductividad infinita (resistividad cero); conductividad de 10 mS / m es equivalente a la resistividad de 100 Ωm ; 1 mS / m es equivalente a 1000 Ωm

El método Monte Carlo se utiliza para obtener los resultados de la Figura 5. El parámetro en la Figura 5 muestra tres valores de la conductividad del suelo (σ), es decir, infinita (tierra ideal), 10 mS / m y 1 mS / m. Al evaluar las tensiones inducidas por los rayos, ver Rachidi et al. [B91] y CIGRÉ C4.401 [B30] el valor finito de la conductividad del suelo, por un lado aumenta las pérdidas por propagación de transitorios en la línea, pero, por otro lado, tiene también una influencia en la propagación LEMP. Mientras que el primer efecto tiende a disminuir las sobretensiones que se propagan a lo largo de la línea, el último

tiende en general a aumentar la amplitud de las tensiones inducidas. Es este segundo efecto que en general produce amplitudes de tensiones inducidas mayores que las obtenidas para el caso de un terreno ideal, ver Ishii et al. [B65], Rachidi et al. [B91] y CIGRÉ C4.401 [B30].

Como punto de referencia, una línea de distribución de altura de 10 m en campo abierto con $GFD = 1 \text{ rayo/km}^2/\text{año}$ tendrá aproximadamente 11 rayos directos/ 100 km/ año, utilizando la ecuación (6), cada uno dará como resultado una descarga disruptiva. En terreno abierto, las tensiones inducidas serán un problema para las líneas que se caracterizan por tener bajos niveles de aislamiento y / o por atravesar un terreno de baja conducción. Por ejemplo, para el caso de una línea aérea por encima de un terreno perfectamente conductor, el número de descargas disruptivas de tensión inducida será mayor que el número de descargas disruptivas por descargas directas para un circuito sin tierra sólo si el (CFO) es inferior a 75 kV (la Figura 5). Sin embargo, si la conductividad del suelo es pobre (por ejemplo, $\sigma = 1 \text{ mS/m}$), el CFO para el cual el número de descargas disruptivas de tensión inducida será mayor que el número de descargas disruptivas por descarga directa, este deberá ser inferior a 140 kV (de la Figura 5).

Los resultados que se muestran en la Figura 5 son para una línea de distribución en campo abierto, sin árboles o edificios cercanos. El número de descargas disruptivas inducidas depende también de la presencia de objetos cercanos que pueden blindar la línea de rayos directos. Esto puede aumentar las descargas disruptivas de tensión inducida debido a que habrá descargas más cercanas. Por lo tanto, en las zonas blindadas, las descargas disruptivas de tensión inducida son más de una preocupación.

Un cable de neutro a tierra o OHGW reducirá la tensión a través del aislamiento por un factor que depende de la separación entre tierras adyacentes. Para este análisis, una fórmula del factor de blindaje se ha obtenido a partir de una fórmula que se encuentra en Rusck [B100] asumiendo el cable neutro como conductor no energizado y con conexiones a tierra continuas. Este factor está típicamente entre 0.6 y 0.9, la adopción de un factor de blindaje da resultados bastante precisos solamente para los valores de espaciados cortos entre dos tierras adyacentes, por ejemplo 30 m entre ellas y para la conductividad ideal del suelo. Para un cálculo más preciso, el efecto de la presencia de un conductor de tierra debe ser tratado de la misma manera que los demás conductores de las líneas, como en Rachidi et al. [B91], y teniendo en cuenta la distancia real entre las tierras adyacentes, como en Paolone et al. [B84]. La distancia entre la terminación de la tierra adyacente, en lugar del valor de la resistencia conseguida en cada poste, es el parámetro que tiene la mayor influencia en la eficacia de protección debido a que las resistencias de los postes son típicamente mucho menores que la impedancia característica del neutro o del cable de guarda.

Tenga en cuenta que los circuitos con un cable neutro a tierra o OHGW en general tendrán menos descargas disruptivas para un CFO establecido, debido a que el conductor puesto a tierra reduce el esfuerzo de tensión por medio del aislamiento a través de su efecto de apantallamiento electromagnético. Sin embargo, la presencia del conductor de puesta a tierra resulta en dos caminos posibles de flameo: a) de fase a tierra y b) de fase a la puesta tierra. Esta segunda trayectoria se caracteriza en general por un valor CFO inferior, lo que significa que con el tiempo la línea podrá experimentar una reducción global de CFO, esto puede apreciarse adecuadamente por medio de herramientas informáticas disponibles, consulte Yokoyama [B114] Borghetti y col. [B22]

En la proximidad de los descargadores de sobretensión se puede mitigar los efectos de las tensiones inducidas por rayos. Los resultados de Borghetti et al. [B22] y Paolone et al. [B84] muestran que una mejora significativa en el desempeño de la línea de distribución frente al rayo puede ser obtenida mediante la reducción de la separación entre los descargadores de sobretensiones por debajo de unos pocos cientos de metros. De nuevo, para una evaluación precisa de la necesidad de proteger cada fase con un descargador de sobretensión y de la separación entre estos, es necesario la utilización de un software disponible con conocimientos de las características no lineales de los dispositivos de protección.

Es evidente que una evaluación más precisa del comportamiento de un rayo directo debe tener en cuenta la topología real y la geometría de las redes de distribución, que están constituidas por líneas cortas terminadas en componentes del sistema de alimentación (por ejemplo cargas y transformadores), en general protegidos por descargadores de sobretensión. Para este fin, las herramientas computacionales basadas en EMTP están disponibles, ver Nucci y Rachidi [B83].

En común con la norma IEEE 1243-1997 y la literatura con más publicaciones, los resultados reportados se han expresado en términos de "flameo/100km/año" esta medida es significativa para los sistemas de transmisión que se caracterizan por la presencia de largos tramos de línea con una construcción uniforme que a su vez puede ser menos útil para sistemas de distribución con características irregulares, tales como una mezcla de alimentadores trifásicos con laterales monofásicos con diferente estructura. Se sugiere que los resultados de las tasas de interrupción del rayo en el sistema de distribución se presentan al hacer referencia al sistema de interés específico, según su topología y la configuración, es decir, número y ubicación de los descargadores de sobretensión, la presencia de conductores blindados, etc. y simplemente proporcionando los resultados en términos de número de descargas por año.

3.3 Nivel de aislamiento de la línea de distribución

Esta guía de diseño es un intento de ayudar al ingeniero del sistema de distribución a optimizar las capacidades de aislamiento en las líneas aéreas de distribución, la mayor parte de la construcción aérea utiliza más de un tipo de material aislante para protección contra rayos.

Los componentes aislantes más comunes utilizados en la construcción de líneas de distribución aérea son de porcelana, aire, madera, polímero y fibra de vidrio. Cada elemento tiene su propia fuerza de aislamiento, cuando se usan los materiales de aislamiento en serie el nivel de aislamiento resultante no es la suma de los niveles asociados con los componentes individuales pero es algo menor que ese valor.

Los siguientes factores afectan los niveles de descargas en líneas de distribución y hacen que sea difícil estimar el nivel de aislamiento total:

- a) Las condiciones atmosféricas incluyendo la densidad del aire, la humedad, la lluvia y la contaminación atmosférica.
- b) Polaridad y la velocidad de aumento de tensión.
- c) Los factores físicos tales como la forma de aislante, forma de herrajes, y la configuración del aislador (montados verticalmente, horizontalmente o en algún ángulo)

El efecto de la madera en la descarga del rayo sobre la resistencia del aislamiento puede ser muy variable, la mejora depende principalmente del contenido de humedad de la superficie y en un grado menor de las dimensiones físicas de la madera y la proporción entre la trayectoria de la madera y la distancia del arco seco.

A pesar de que el ingeniero de diseño pueda estar más familiarizado con el nivel básico de impulso de aislamiento (BIL) de una determinada combinación de materiales aislantes, los resultados de esta guía se dan en términos del CFO de estas combinaciones. El CFO se define como el nivel de tensión en el que estadísticamente hay una probabilidad del 50% de descargas y una probabilidad del 50% de soportar, este valor de resistencia se define en las pruebas de laboratorio y tiende a tener una distribución de Gauss estrecha, en comparación con las amplias distribuciones logarítmica normal de estrés en base a la Tabla 1. Si se supone una distribución gaussiana de la fuerza de descargas, entonces cualquier probabilidad específica de resistir pueda ser calculado estadísticamente a partir del valor CFO y la desviación estándar.

A medida que se dispone de los datos de laboratorio, varios métodos se estudiaron en un intento de desarrollar un procedimiento para su uso en la determinación del esperado CFO de una combinación dada de componentes aislantes. El enfoque de "mayor fuerza de aislamiento " puede ser el más práctico.

Este método fue adoptado de un procedimiento similar al utilizado anteriormente en el diseño de líneas de transmisión, pero se ha ampliado en su aplicación a múltiples componentes aislantes utilizados en la construcción de la línea de distribución. Utiliza el CFO del elemento básico o primario de aislamiento y se suma a el valor del aumento de CFO ofrecido por un componente añadido (teniendo en cuenta que la resistencia de aislamiento añadido es siempre menor que la del elemento individual añadido).

3.4 CFO de tensión de aislamiento combinado

Desde los primeros tiempos, los ingenieros eléctricos han estado construyendo líneas de distribución mediante crucetas de madera y postes en serie con aisladores básicos para aumentar la fuerza de aislamiento de las líneas de distribución. Una pregunta planteó, cuánta fuerza añade la madera a el aislamiento primario del aislador de porcelana, una respuesta parcial llegó a través de la investigación en muchos laboratorios, y algunos resultados fueron publicados en los años 1940 y 1950, véase Clayton y Shankle [B31]. Un resumen general de los trabajos anteriores sobre el CFO se presentó en el Informe de 1950 del Comité EEI [B2] y un informe ampliado [B3] en 1956. Se la mayor parte de estos resultados se desarrollaron para líneas de transmisión, pero los altos niveles de aislamiento de impulso ahora son relevantes para la construcción de líneas de distribución como una contramedida para descargas inducidas y disruptivas de sobre tensión.

La investigación mas reciente continúa en combinaciones de varios dieléctricos usados en los sistemas de energía eléctrica. Estas investigaciones se ocupan de las líneas de distribución y transmisión y el nivel que soportar la madera cuando se somete a rayos, ver Darveniza et al. [B36], Guerrieri et al. [B56], Jacob et al. [B66] y [B67], Pigini et al. [B89], Ross y Grzybowski [B97], Shwehdi [B106], Shwendi y El-Kieb [B107]. Aisladores poliméricos y crucetas de fibra de vidrio se han introducido en las líneas de distribución a partir de la década de 1970, véase Cherney et al. [B25], Elrod y Menzel [B47], Grzybowski y Jacob [B57] y Shwehdi [B106] y Shwendi y El-Kieb [B107]. Desde el punto de vista de la actuación de un rayo, los aisladores poliméricos tienden a ofrecer la misma fuerza de

impulso de descargas externas como los aislantes de cerámica de las mismas dimensiones.

3.5 Determinación de tensión de CFO en estructuras con serie de aislamiento

Los estudios han indicado que 1 m de madera o de fibra de vidrio añade aproximadamente entre 330 kV y 500 kV de resistencia al impulso de rayo del aislamiento total, véase la Grzybowski et al. [B57], [B58] y [B59]. Para longitudes más largas, la resistencia de aislamiento de la combinación de cruceta de madera o fibra de vidrio y el aislante está determinada principalmente solo por la cruceta de madera o fibra de vidrio. El aislamiento nominal de voltaje de CA se obtiene por el aislante solo y de la cruceta de madera o fibra de vidrio se considera sólo como aislamiento adicional para sobretensión del rayo.

Cuando la ruta de descarga del rayo a tierra no incluye una cruceta de madera o fibra de vidrio, sino que implica dos o más tipos de aisladores en serie, el CFO de la combinación no se obtiene por la simple adición de los CFO individuales de los componentes. Los CFO de estos aislamientos combinados son controlados por un número de diferentes factores, cada uno de los cuales requiere un análisis individual. Hoy en día, hay muchas combinaciones diferentes y configuraciones en uso por las empresas que operan.

El extendido método para calcular el CFO añadido puede ser utilizado para estimar el CFO total de una estructura de distribución por:

- a) La determinación de la contribución de cada componente de aislamiento adicional para el CFO total de la combinación.
- b) La estimación del CFO total de la combinación conociendo el CFO de los componentes de aislamiento.

Esto se puede hacer utilizando tablas o curvas que muestran los datos experimentales disponibles y la utilización de estos datos para relacionar el efecto de un material aislante añadido a otro. Este procedimiento se basa en los datos de características de CFO del aislamiento básico y un conjunto adicional de datos compuestos como el CFO de la tensión añadida por una componente específica.

En configuraciones en las que están implicados dos componentes, el CFO de la combinación es mucho menor que la suma de los CFO individuales. El aislante se considera como el aislamiento primario o básico. El CFO obtenido para las configuraciones que consta de dos componentes se calcula como el CFO del componente base, así como CFO agregado del segundo componente.

La tensión CFO total calculada por dos componentes es:

$$CFO_T = CFO_{ins} + CFO_{add.sec} \quad (12)$$

Para tres o más componentes:

$$CFO_T = CFO_{ins} + CFO_{add.sec} + CFO_{add.third} + \dots + CFO_{add.nth} \quad (13)$$

Dónde

CFO_T : es la tensión crítica de flameo de las múltiples formas de aislamiento en serie

CFO_{ins} : es la tensión crítica de flameo del aislamiento primario

$CFO_{add.sec}$: es el CFO adicional añadido por el segundo componente

$CFO_{add.third}$: es el CFO adicional añadida por el tercer componente

$CFO_{add.nth}$: es el CFO adicional añadido por el componente de orden n

Tabla 2.a –tensión crítica de flameo primaria

CFO de aislamiento primario		
Descripción	tipo	$CFO_{ins}(kV)$
Aislador line post Gamma, PL0150011	15 kV, ANSI (C29.18)	155
Aislador polimerico Celsa	15 kV	180
Aislador line post Gamma PL0350011	35 kV, ANSI (C29.18)	230
Aislador polimerico Celsa	35 kV	265

Tabla 2.b –tensión crítica de flameo primaria y CFO de Componentes agregados.[B117]

CFO ^{1,2} de aislamiento primario			CFO añadido del segundo componente		CFO añadido del tercer componente
Descripción	tipo ³	CFO _{ins} (kV)	Descripción	CFO _{add.sec} (kV/m)	Descripción y CFO _{add.third} (kV/m)
polímero aislante	15 kV a 35 kV		Poste de madera	210	Poste de madera 65
			Poste de fibra	410	
Cerámica tipo pin-aislador	ANSI 55-4 ANSI 55-5 ANSI 55-6	105	Poste de madera	235	Separador de fibra 200
		120	Cruceta de madera	250	
		140	Poste de fibra	400	
		Cruceta de fibra	250		
		Separador de fibra	315		
Cadena de aisladores de cerámica vertical	1x102 mm 2x102 mm 3x102 mm(4’’)	75	Poste de madera	90	
		165	Cruceta de madera	160	
		250	Cruceta de fibra	250	
		Separador de fibra	315		
Cadena de aisladores de cerámica horizontal	1x102 mm 2x102 mm 3x102 mm(4’’)	75	Poste de madera	90	
		165	Cruceta de madera	160	
		250	Cruceta de fibra	250	
		Separador de fibra	315		
Descripción	tipo	CFO _{ins} (kV)	Descripción y CFO _{add.sec} (kV/m)		
Madera	Poste	330	Poste de madera 65		
	Cruceta	360			
Fibra de vidrio	Poste	470	Separador de fibra 200		
	cruceta	500			
Aire	Separador	600			
NOTA 1-Todos los valores son los niveles CFO obtenidos en las pruebas estándar de humedad.					
Nota 2. Los valores son el mínimo de los valores de polaridad negativa y positiva.					
Nota 3. Los aisladores se muestran sólo como ejemplos. Consulte la información del fabricante para los valores más exactos					

Los valores dados en la Tabla 2 se refieren a condiciones de humedad que se recomiendan para la estimación de CFO. Para valores CFO en condiciones secas obtenidas a partir de los fabricantes o de los ensayos de impulso de laboratorio, se multiplican los valores CFO secos en un $0,8 \pm 0,1$ para obtener una estimación de CFO para condiciones de humedad. Para componentes no dados en la Tabla 2, CFO total puede estimarse por la reducción para el segundo y tercer componente como:

$$\begin{aligned} CFO_{add.sec} &= 0.45 \times CFO_{ins} \\ CFO_{add.third} &= 0.2 \times CFO_{ins} \end{aligned} \quad (14)$$

Dónde

$CFO_{add.sec}$ es el CFO adicional añadido por el segundo componente

$CFO_{add.third}$ es el CFO adicional añadió por el tercer componente

CFO_{ins} es la tensión crítica de flameo del aislamiento primario

El uso del método del CFO extendido y las tablas que figuran en esta guía suele dar respuestas dentro de un error de $\pm 20\%$ añadido. La variación en la humedad del poste con la exposición al aire libre y en menor medida el tratamiento químico afecta la resistividad de la madera y también influyen en la fuerza de aislamiento del poste y cruceta de madera. Las estimaciones que se pueden obtener con los siguientes métodos son más precisas:

- a) Realizar pruebas de laboratorio de la estructura en condiciones húmedas, este método le dará los resultados más precisos.
- b) Realizar pruebas de la combinación en condiciones secas y multiplicar el valor CFO por 0.8 para estimar la condición húmeda CFO
- c) Utilizar CFO de los componentes más detallados dados en Jacob et al. [B66] y [B67] o Shwehdi [B106].
- d) Refiérase a otros resultados de prueba de estructuras de distribución, como en Armstrong et al. [B7] o Darveniza et al. [B37] y [B38]

3.6 Consideraciones prácticas al aumentar el CFO de la estructura

Equipos y piezas de sujeción de las estructuras de distribución podrían reducir severamente el CFO por debajo del nivel de 300 kV recomendado para mitigar descargas disruptivas de sobretensión, en mayor parte inducidos. La reducción de los CFO de estructuras "weaklink" puede aumentar en gran medida las descargas disruptivas de las tensiones inducidas, como se muestra en la Figura 5. Varias situaciones se describen a continuación.

3.6.1 Templatees

Los cables de sujeción pueden ser un factor importante en la reducción del CFO de una estructura. Para la ventaja mecánica, cables de sujeción se unen generalmente en la parte alta del poste en la vecindad de los principales elementos aislantes. Debido a que los cables de retención proporcionan una trayectoria eléctrica a la tierra, usualmente su presencia tiende a reducir el CFO de la configuración. Los pequeños aisladores de porcelana que se utilizan a menudo ofrecen muy poco aislamiento adicional (normalmente menos de 30 kV de los CFO)

Un aislante de fibra de vidrio en serie con un cable de sujeción se puede utilizar para ganar considerable resistencia de aislamiento, un aislador de fibra de vidrio de 50 cm tiene un CFO de aproximadamente 250 kV.

3.6.2 Fusibles cortacircuitos

El montaje de los fusibles cortacircuitos es un buen ejemplo de los equipos sin protección que pueden disminuir el CFO de un poste. Para los sistemas de clase 15 kV, un fusible de desconexión puede tener un BIL de 95 kV, dependiendo de cómo se monte el cortacircuito se puede reducir el CFO de toda la estructura aproximadamente 95 kV (debido a que el BIL de cualquier sistema de aislamiento con una baja probabilidad de fracaso es siempre menor que el CFO de dicho sistema con una probabilidad del 50% de fallo).

En los postes de madera, el problema de los fusibles cortacircuitos por lo general puede ser mejorado organizando de manera que la abrazadera de fijación esté montada en el poste lejos de cualquier conductor conectado a tierra (cables tensores, cables de tierra y los cables neutros). Esta es también una preocupación para los interruptores y otros equipos no protegidos por pararrayos.

3.6.3 Altura del cable neutro

En cualquier línea dada, la altura del cable neutro puede variar dependiendo del equipo conectado. En los postes de madera, cuanto más cerca esté el cable neutro de los cables de fase menor será el CFO.

3.6.4 Estructura de materiales eléctricamente conductores

El uso de estructuras de hormigón y de acero en líneas aéreas de distribución reduce en gran medida el CFO en comparación con las estructuras de madera o de fibra de vidrio no unidas. Crucetas metálicas y herrajes de metal también están siendo utilizados en estructuras de postes de madera. Si están conectados a tierra tales elementos, el efecto puede ser el mismo que el de una estructura completamente metálica. En estas estructuras el CFO total es suministrado por el aislante y en aisladores el CFO más alto se debe utilizar para compensar la pérdida de aislamiento de madera. Obviamente, las compensaciones deben hacerse entre el comportamiento del rayo y otras consideraciones tales como el diseño mecánico o la economía, es importante darse cuenta de que existen ventajas y desventajas. El diseñador debe ser consciente de los efectos negativos que los elementos de metal y postes conductores de electricidad pueden tener sobre el comportamiento del rayo y tratar de minimizar estos efectos. En los diseños de postes y crucetas de madera, se puede utilizar soportes de madera o fibra de vidrio para mantener buenos niveles de aislamiento.

3.6.5 Espinterómetros y unión aislante

La unión de equipos aislantes se hace a veces para reducir al mínimo el riesgo de daños causados por rayos a postes de madera o crucetas, o para evitar incendios en las puntas de los postes. Los espinterómetros se utilizan también para reducir al mínimo el riesgo de daños causados por rayos a material de madera. El uso de espinterómetros era una práctica sugerida por las especificaciones de distribución de servicios públicos rural en los EE.UU. en 1983, pero ya no es una práctica sugerida, ver USDA [B112]. En algunas partes del mundo los descargadores se utilizan en lugar de este o en combinación de series, pararrayos de óxido de metal para protección del equipo y los descargadores de carburo de silicio que quedan en servicio también tienen brechas en serie.

Descargadores y el aislante reducirán en gran medida el CFO de una estructura. Si es posible los descargadores, aislantes, y los conjuntos de protección de postes no deben ser usados para prevenir daños a la madera. Una mejor solución para evitar daños e incendios en los postes de madera es utilizar enlaces aislantes de madera locales en la base del aislador como se discute en 3.8.

3.6.6 Múltiples circuitos en un mismo poste

Múltiples circuitos en un poste a menudo causan aislamiento reducido. Separaciones más estrictas de fase y menor longitud de la madera suelen reducir los niveles de aislamiento. Esto es especialmente cierto para los circuitos de distribución construidos por debajo de circuitos de transmisión en los postes de madera. Los circuitos de transmisión a menudo tienen un OHGW con cable de tierra en cada poste. El cable de tierra puede causar un aislamiento reducido, esto se puede mejorar si se coloca el cable de tierra lejos del poste con separadores de fibra de vidrio.

3.6.7 Separador de cables en circuitos

Los separadores de cable en circuitos de distribución generalmente tienen muy poca separación entre los conductores. Los cables cubiertos y separadores (15 cm - 40 cm) colgados de un cable mensajero proporcionan apoyo y capacidad aislante. Una configuración de separador-cable tendrá un CFO fijo, normalmente en el intervalo de 150 kV a 200 kV. Debido a su nivel de aislamiento es relativamente bajo, la actuación del rayo puede ser inferior a un diseño abierto más tradicional, véase Powell et al. [B90]. Es poco lo que se puede hacer para aumentar el CFO en un diseño de separación de cables.

Un diseño de separador de cable tiene la ventaja de un cable mensajero que tiende a actuar como un OHGW. Esto puede reducir algunas descargas disruptivas por descargas directas. El flameo inverso es probable que ocurra debido al bajo nivel de aislamiento, una mejora en la tierra puede mejorar el comportamiento de un rayo si la conductividad del suelo es alta y la separación entre la zona es inferior a 30 m.

Los circuitos con separador de cable se instalan normalmente en zonas donde los contactos de los árboles son un problema de confiabilidad, también pueden ser instalados en los circuitos con conductores abiertos existentes para ahorrar espacio. En cualquier caso, el cable separador está generalmente protegido contra el flameo. Además, la tasa de descarga disruptiva inducida se reduce porque se induce tensión similar sobre cada uno de los conductores estrechamente espaciados cuando se energizan por los campos electromagnéticos (EM) generados por el rayo cercano.

3.7 Capacidad de extinción de arco de la madera

Postes y crucetas de madera han demostrado la capacidad de apagar el arco causados por rayos, elevando el voltaje de encendido del arco de CA a niveles que minimizan el riesgo de fallas de potencia y frecuencia, ver Armstrong et al. [B7] y Darveniza et al. [B37] y [B38].

Las capacidades de extinción de arco de madera es principalmente una función de tensión de alimentación de frecuencia instantánea a través del arco en el instante de la descarga disruptiva causada por rayos. Si el voltaje está cerca de un cruce por cero, el arco es mucho más probable a extinguir sin causar un fallo, si la tensión nominal a lo largo de la cruceta de madera se mantiene por debajo de un cierto nivel, la probabilidad de desarrollar un fallo puede reducirse en gran medida.

Si se producen múltiples descargas disruptivas, la extinción de arco es mucho menos probable (véase la Figura 6). La mayoría de las líneas de distribución van a sufrir múltiples descargas disruptivas de cada descarga directa. En las estructuras de distribución que tienen gradientes de voltaje RMS a través de la madera superior a 10 kV / m de madera, la extinción del arco no puede proporcionar un beneficio significativo por ejemplo una línea de distribución de 13,2 kV con 0,5 m de madera entre el aislador de fase y el cable neutro tiene un gradiente de voltaje RMS a través de la madera de $13,2 \text{ kV} / (\sqrt{3} \times 0,5 \text{ m}) = 15,2 \text{ kV} / \text{m}$. Por esta tensión, si se logra el espaciamiento en la madera de 1 m entre todos los conductores de fase y todos los objetos conectados a tierra en el poste, entonces la extinción del arco puede llegar a ser un factor significativo, esto se puede conseguir fácilmente en circuitos con niveles altos de aislamiento y las largas distancias de madera. Para esta guía, se hace una suposición conservadora de que todas las descargas disruptivas causan fallas.

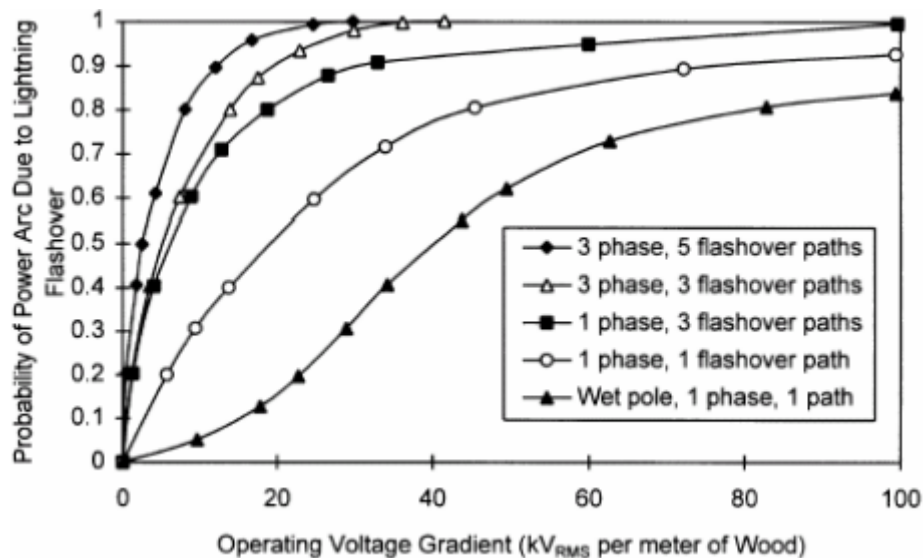


Figura 6 - Probabilidad de un arco debido a una descarga disruptiva sobre un brazo de madera mojado, de Darveniza et al. [B38]

3.8 Daños en la madera causados por rayos

La experiencia de servicio indica que los daños en postes o crucetas debidas a descargas atmosféricas es relativamente rara, ver Darveniza [B37]. Sin embargo, en zonas de alta densidad puede ser una preocupación en ciertas condiciones. La probabilidad de daños debido a rayos depende de muchos factores, sobre todo el contenido de humedad y el envejecimiento de la madera. El daño y rotura de la madera se produce cuando la ruptura es interna en lugar de a lo largo de la superficie, si la madera es de color verde, es más probable que colapse internamente.

Los registros históricos muestran que los daños en la madera es un problema, esta puede ser protegida por la unión de los aisladores, sin embargo, este enfoque es de cortacircuitos en la capacidad de aislamiento proporcionado por la madera, una mejor solución puede ser el uso de electrodos de superficie instalada cerca del pin aislante. Esto puede incluir envolturas de alambre, bandas, u otras extensiones metálicas unidas cerca del aislador en la dirección probable del rayo. Esto fomenta el colapso cerca de la superficie en vez del interior.

Las medidas preventivas para daños causados por rayos de madera también reducirán la probabilidad de incendios en la punta de poste, que es el resultado de arcos de corriente de fuga en las interfaces de metal-madera, ver Darveniza [B37] y Ross [B97]. Unión local, utilizando bandas de alambre o envolturas, tenderá un puente sobre el lugar donde los incendios son más propensos a comenzar en contactos pobres de metal con madera. Esto es preferible a unir completamente los aisladores.

3.9 Límites para aumentar la fuerza de aislamiento para mejorar la actuación del rayo

La cláusula 3 ha demostrado que las líneas aéreas pueden ser protegidas contra sobretensiones inducidas por descargas con el uso adecuado de los niveles del CFO de 300 kV o más, dependiendo de la conductividad del suelo y la altura de la línea, y que puede resultar práctico alcanzar este nivel en cada estructura de distribución mediante el aprovechamiento de la resistencia de aislamiento de la serie de madera o la fibra de vidrio. La pregunta más difícil tratada en la cláusula 4 y 5 es la cláusula de protección de las líneas aéreas contra descargas directas. La protección por descargas directas es el cable de guarda (OHGW) es eficaz en líneas de transmisión ya que el producto de la descarga de corriente y la elevada resistencia local es menor que el CFO del aislador en la mayoría de los casos. Con una reducción de CFO en líneas con tensión inferior a 69 kV, OHGW son menos eficaces o ineficaces. En cambio, las filosofías básicas para la protección de las líneas aéreas de distribución a partir de descargas directas consideran que:

-El uso de cables de guarda reduce el riesgo de descargas directas a conductores de fase, pero aumenta el riesgo de flameo inverso. OHGW puede reducir el riesgo global de interrupciones del rayo si la conductividad del suelo es alto. El valor deseado de la resistencia de tierra depende del CFO de la línea y en general la resistencia de cada poste tiene que ser menor que el $CFO(kV)/(15kA)$ en alrededor de 25% de eficacia contra descargas disruptivas del aislamiento por descargas directas. Usualmente, no es práctico alcanzar valores de resistencia tan bajos en postes en la mayoría de las áreas.

-El uso de descargadores en todas las fases de un sistema trifásico y aplicado en el mismo poste puede reducir la tasa de descarga disruptiva a partir de descargas directas si los descargadores están correctamente seleccionados. El espaciamiento de los

descargadores no debe ser más de uno o dos postes debido a los rápidos tiempos de subida de descarga directa del rayo. Tasas de falla de descargas destructivas del orden de 20% se deben esperar para los rayos directos, incluso con los márgenes de protección relacionados con descargadores de alta resistencia.

-El uso combinado de los descargadores y de cable guarda aéreo proporciona protección complementaria a las líneas de distribución. Los cables de guarda generales desvían la mayor parte de la energía de un rayo lejos de los conductores de fase y los equipos conectados, los descargadores limitan las tensiones máximas del aislador y reducen las tasas de flameo inverso con más eficacia que la mejor de la puesta a tierra de cada poste. Si bien este diseño híbrido se considera eficaz, las descargas disruptivas todavía ocurrirán pero en un grado mucho menor.

4. OHGW protección de líneas de distribución

Los OHGW están conectados a tierra, son conductores colocados por encima de los conductores de fase para interceptar descargas de rayo que de otra manera terminaría en las fases. La corriente del rayo se desvía a través de la tierra del poste, la efectividad del OHGW requiere de estar conectados a tierra en cada poste.

La sobretensión del rayo fluye a través de la impedancia de tierra del poste provocando un aumento de potencial, dando como resultado una gran diferencia de tensión entre el cable de tierra y los conductores de fase, la diferencia de tensión puede causar un falmo inverso a través del aislamiento del cable de tierra a uno de los conductores de fase.

El fenómeno de flameo inverso es una limitación sustancial a la eficacia del OHGW en aplicaciones de línea de distribución. OHGW puede proporcionar una protección eficaz sólo si:

- a) Las prácticas de un diseño de aislamiento se utilizan para proporcionar suficiente CFO entre la descarga de tierra y los conductores de fase.
- b) Se obtienen baja resistencias de tierra del poste.

La Figura 5 se puede usar para estimar el número de descargas disruptivas inducidas para un diseño de OHGW. Para los circuitos de distribución de tres cables, añadiendo un OHGW reducirá el número de descargas disruptivas inducidas. Desde que esté conectado a tierra el OHGW, que suprime las tensiones en los conductores de fase a través del acoplamiento de la impedancia característica. Cuanto más cerca estén los cables de fase del OHGW, mejor será el acoplamiento y las tensiones inducidas serán más pequeñas (aunque esto puede reducir el CFO, como se discute en 3.3). Tenga en cuenta que la adición de un cable de puesta a tierra por debajo de los conductores de fase tendrá aproximadamente el mismo efecto de acoplamiento mutuo que un OHGW encima de las fases.

Sobre un sistema de cuatro cables, multiconectados con tierra reemplazando el cable neutro con un OHGW no reducirá significativamente el número de descargas disruptivas inducidas, ya que habrá pocos cambios en la impedancia característica mutua que establece el coeficiente de acoplamiento de voltaje, sin embargo tener a la vez un OHGW y un cable neutro va a mejorar el rendimiento en cierta medida debido a que el coeficiente de acoplamiento será mayor.

El costo de incluir un OHGW en un diseño de línea de distribución puede ser sustancial. Además del costo del conductor, la tierra del poste y aislamiento adicional. La altura del poste debe ser mayor para apoyar el OHGW de tal manera que haya un ángulo de blindaje suficiente entre el OHGW y los conductores de fase exteriores, la mayor altura de la estructura atrae más rayos directos y esto compensa ligeramente algo de la reducción de la tasa de descarga destructiva proporcionada por el blindaje. A pesar de las dificultades de costos y de diseño, el OHGW se ha utilizado en las líneas de distribución por parte de algunos servicios públicos con gran éxito.

4.1 Ángulo de apantallamiento

Se recomienda un ángulo de apantallamiento (como se muestra en la Figura 7) de 45 ° o menor para que la mayoría de los rayos terminen en el OHGW en lugar de los conductores de fase. Esta guía sólo es válida para las líneas de menos de 15 m de altura con Espacio conductor inferior a 2 m, líneas más altas requieren ángulos de apantallamiento más pequeñas.

Para obtener más información sobre el blindaje con cable de tierra aéreo, se debe referir a la norma IEEE 1243-1997 y sus referencias. La mayoría de las curvas de ángulo de apantallamiento se dibujan para circuitos de transmisión, a partir de una corriente crítica de 5 kA para causar una falla del blindaje por una descarga destructiva. Hay que reconocer que las corrientes críticas para los circuitos de distribución serían más bajas, en el rango de 2 a 3 kA aceptada como la corriente mínima de descarga del rayo, esto actuará para reducir el ángulo de apantallamiento requerido. Mediciones de la red de detección de rayos en América del Norte indican la posibilidad de valores de corriente inferiores, ver Cummins et al. [B35]. Esto reduciría también el ángulo de apantallamiento requerido para el objetivo de blindaje frente a la tasa de fallo por descarga destructiva. Los modelos electrogeométrico que forman la base de las recomendaciones de ángulo de blindaje también están bajo revisión continua.

En las zonas donde existen líneas de distribución con un ángulo de apantallamiento de 45 ° se desempeña bien esta práctica. Un ángulo de apantallamiento menor de 30 ° debe ser utilizado para nuevas normas de construcción o de diseño y para mejorar la calidad de la energía en las líneas existentes.

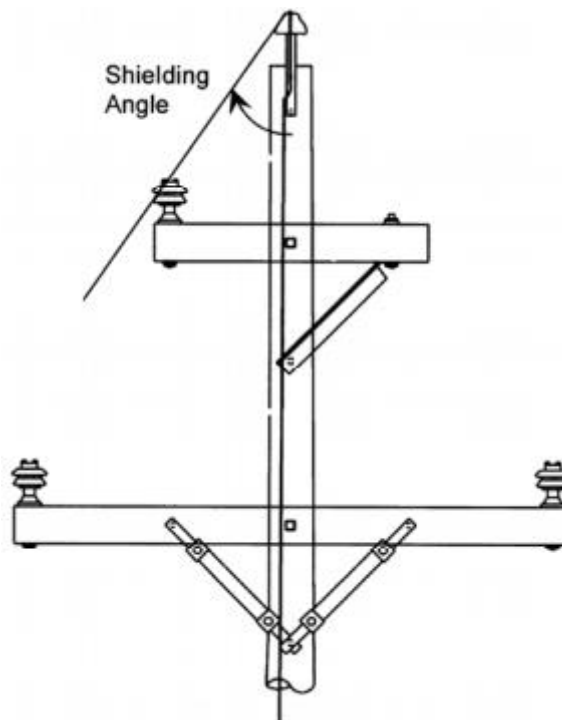


Figura 7 - Ángulo de protección OHGW

La eficacia del OHGW en líneas de distribución depende en gran medida del aislamiento proporcionado entre el cable de tierra y los conductores de fase. Si el cable de tierra está en contacto con el poste en la totalidad de su altura, es difícil proporcionar un aislamiento adecuado. En un poste de madera, por lo general es necesario aislar el cable de tierra desde el poste en la proximidad de los aisladores de fase y crucetas. Esto se puede lograr con fibra de vidrio y varillas o separadores montados horizontalmente en el poste para mantener el cable de tierra 30 cm - 60 cm de distancia desde el poste, como se muestra en la Figura A.2. El CFO del cable de tierra a la fase más cercano es el valor más limitante de varios caminos. También se debe tener cuidado para aislar los cables de sujeción para obtener el CFO necesario.

Un CFO en exceso de 250 kV a 300 kV es necesario para la eficacia de las aplicaciones del OHGW. Mediante el uso de separadores de cable de tierra, no es difícil de lograr este nivel de aislamiento en las líneas de distribución.

4.2 Efecto del nivel de puesta a tierra y el aislamiento

La eficacia del OHGW depende altamente de la puesta a tierra. Para la eficacia de un diseño OHGW, la resistencia de tierra debe ser inferior a 10Ω si el CFO es inferior a 200 kV. Si se presta atención al nivel de aislamiento y el CFO es de 300 kV 350 kV-, una resistencia de tierra 30Ω proporcionará un rendimiento similar. El OHGW debe estar conectado a tierra en cada poste. La figura 8 muestra el comportamiento de una descarga directa y el efecto de puesta a tierra con un ejemplo de simulación por ordenador de un OHGW con CFO de 175 kV y 350 kV. Estudios de disparos de rayos confirman el comportamiento computarizado de los electrodos de tierra en condiciones reales de descargas atmosféricas se presentan en Rakov et al. [B93]

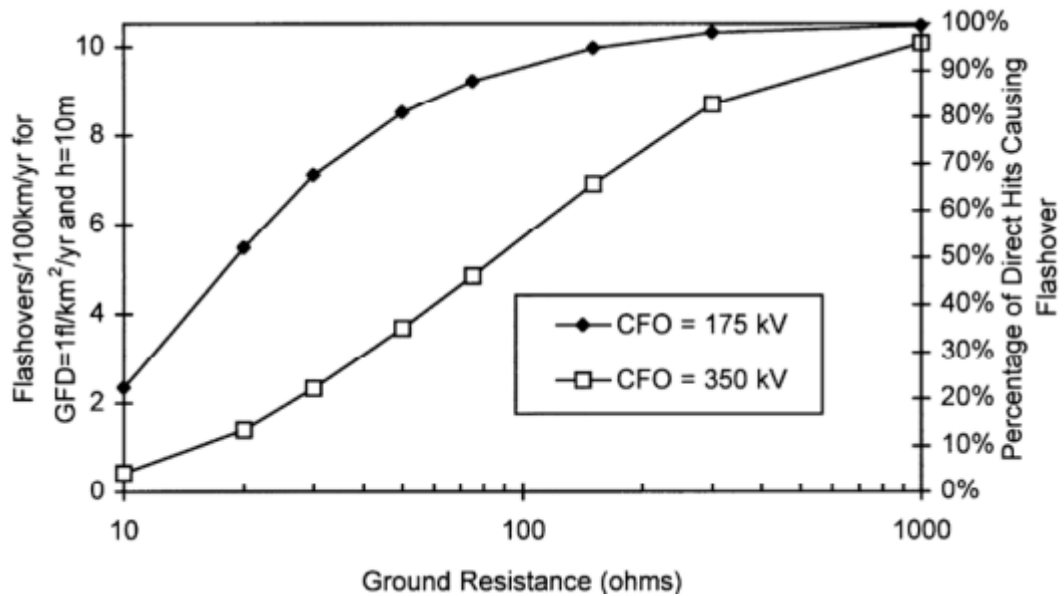


Figura 8- Efecto de la resistencia de la tierra en el rendimiento del OHGW (mostrado como una tasa de interrupción y eficiencia de protección)

4.3 Líneas doble circuito en distribución

Las líneas de distribución doble circuito en las estructuras de transmisión pueden ser especialmente susceptibles a flameo inverso. Mayores alturas de estructura y mayor despeje de vía atraerán más rayos directos a las estructuras. Se debe tener cuidado para mantener altos niveles de aislamiento para evitar altas tasas de descargas anormales.

Además, el esfuerzo de tensión desarrollado puede causar un flameo inverso mayor en el circuito de distribución que en el circuito de transmisión. Esto ocurre debido a que los conductores de distribución están más lejos del OHGW, y por lo tanto, tienen una tensión acoplada inferior y un voltaje más alto a través del aislamiento en comparación con cualquiera de los conductores de transmisión. La resistencia de aislamiento en el circuito de distribución también es por lo general menor que en el circuito de transmisión. Los conductores de distribución recibirán el flameo inverso primero, y entonces ayudan al desempeño del circuito de transmisión.

Se debe tener cuidado para mantener los niveles de baja resistencia a tierra y de alto aislamiento para evitar extrañamente altas tasas de descargas destructivas en los circuitos de distribución. Descargadores de línea en cada poste también deben ser considerados para doble circuito, estos pueden ayudar incluso si se instala en una sola fase, al aumentar la tensión acoplada en las otras fases.

4.4 Cables de tierra y pararrayos

Para eliminar una fracción grande de posibles descargas disruptivas, descargadores en cada poste y cada fase se pueden usar en conjunción con un OHGW. Los descargadores protegerán el aislamiento del flameo inverso. El OHGW desviará la mayor parte de la corriente a tierra, por lo que los descargadores no están sujetos a la entrada de mucha energía. Los descargadores hacen que el diseño del OHGW menos dependiente de los niveles de aislamiento y la puesta a tierra. Uno de los límites de este enfoque es la

creciente incidencia de descarga disruptiva al centro del vano cuando la separación de fase al OHGW es menor que el radio de corona de la corriente de sobretensión en el OHGW. El ingeniero de diseño debe determinar la distancia mínima de separación, mediante el cálculo del radio de la corona en la IEEE Std 1243-1997.

5. Protección pararrayos de líneas de distribución

El descargador se puede usar para proteger el aislamiento de la línea de distribución mediante la reducción de aparición de descargas disruptivas e interrupciones del circuito. Diferentes tipos de pararrayos, tales como carburo de silicio con huecos internamente, externamente o no con huecos de metal-óxido, se han utilizado con el tiempo. Desde el punto de vista de la protección del aislamiento de línea de distribución todos contribuyen de una manera similar. Las diferencias en las características de tensión de descarga harán que sólo una pequeña diferencia en la protección de aislamiento, ya que existe un considerable margen, varios estudios han investigado la eficacia de la separación de diferente pararrayos, ver Paolone et al. [B84], [B85], y Short et al. [B104]. Estudios de rayos desencadenados sobre el rendimiento de los descargadores en las líneas de distribución se presentan en De la Rosa et al. [B46], Fernández et al. [B53], [B54], Maestro et al. [B72] y Mata et al. [B73] y [B74]. En general, no pueden sobrevivir a una descarga directa solo pero compartirlo entre los descargadores paralelos es eficiente, ver Mata et al. [B73] y [B74], y esto puede limitar el intercambio de disipación de energía a niveles razonables.

Para la selección de Valoración del descargador, consulte la norma IEEE Std C62.22-2009 o las instrucciones del fabricante. Para la protección de equipos (especialmente los cables subterráneos), a veces es necesario seleccionar un descargador con el nivel de protección más bajo posible, sin embargo, para la protección de la línea de aislamiento, esto no suele ser necesario porque el nivel de protección del descargador generalmente es considerablemente más bajo que el nivel de la línea de aislamiento

Aplicación de pararrayos para protección, se debe considerar la tasa de fallo de los descargadores agregados junto con la mejor a de la descarga disruptiva de línea obtenida por adición de los descargadores.

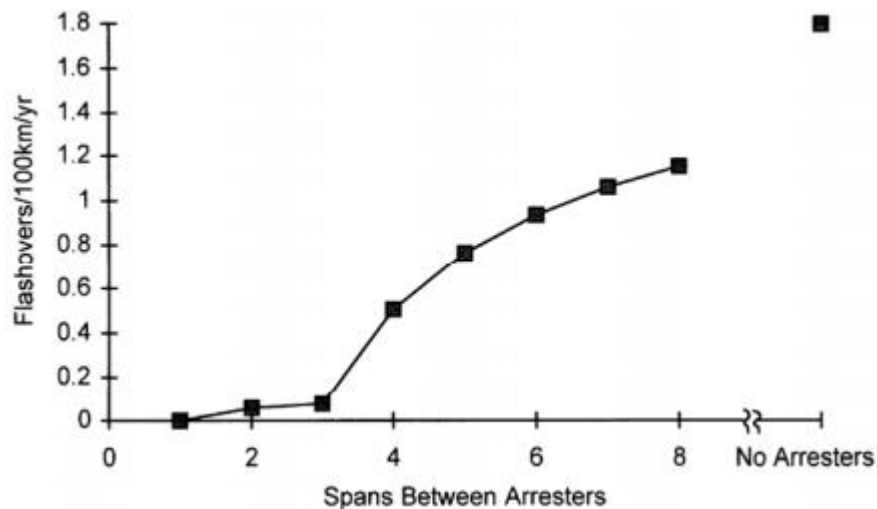
5.1 Consideraciones de longitud de cable de pararrayos

Los cables de pararrayos que conectan los terminales de línea de distribución y de tierra de descargadores para el equipo que protegen contienen una pequeña cantidad de inductancia inherente. Esta inductancia provoca caídas de tensión de $L (di / dt)$ la cual aparecer a través de los cables que conducen las corrientes de sobretensión de rayo, cualquier caída de tensión en un cable de descargador se sumará a la tensión de descarga del descargador esto aumentará la tensión que aparece a través del dispositivo (s) protegido por el descargador.

El efecto de la longitud de la línea principal en la protección del aislamiento de distribución no es tan significativa como lo es con la protección del equipo. Para los equipos de arriba, el margen es en general muy alta además el nivel de aislamiento de la línea es generalmente mucho mayor que el BIL del equipo estándar. Por supuesto, siempre es una buena práctica para mantener en la línea de distribución descargadores y conductores de tierra lo más cortos y rectos posible. Consulte la IEEE Std C62.22-2009 o más información sobre longitudes del descargador.

5.2 Descargas destructivas a partir de descargas cercanas

Los descargadores pueden reducir en gran medida la tasa de descargas debida a tensiones inducidas a partir de descargas cercanas. La Figura 9 muestra los resultados de un CFO de aislamiento de 150 kV para un circuito sin tierra. Tenga en cuenta que incluso, el relativamente amplio espacio del descargador puede reducir descargas disruptivas por tensión inducida significativamente (el producto de 8 tramos da al menos una reducción del 25%). En muchos circuitos de distribución con transformadores de frecuencia, los descargadores se utilizan para proteger los transformadores, y a su vez pueden proporcionar una protección significativa de descargas disruptivas inducidas.



NOTA—CFO=150 kV, $h=10$ m, $N_g = 1$ Rayo/km²/Año, Longitud de espacio = 75 m

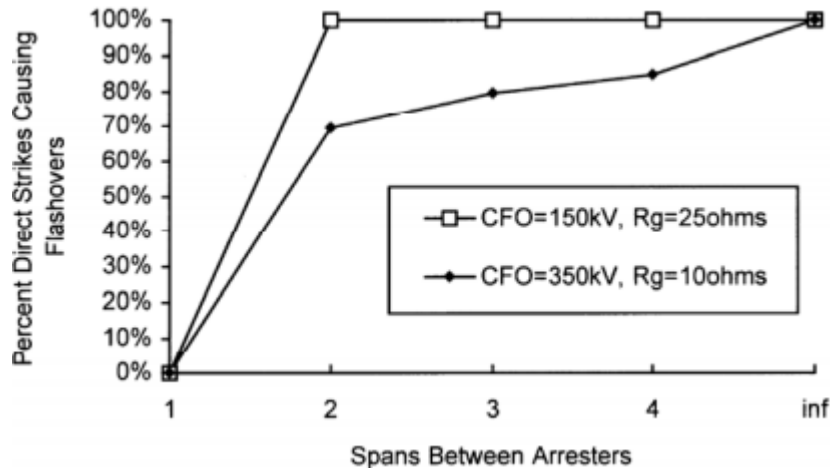
Figura 9- Espacio de pararrayos para descargas de sobretensiones inducidas

El descargador puede ser incluso más eficaz en la reducción de descargas disruptivas inducidas si se utilizan para proteger los postes con niveles pobre de aislamiento. Estos "puntos débiles" pueden incluir recortes, postes de callejón sin salida o postes cruzados. La colocación de descargadores en estos postes puede ser más rentable que la mejora del nivel de aislamiento.

5.3 descargas destructivas a partir de descargas directas

La protección contra rayos directos es difícil debido a las altas corrientes de sobretensión, tasas empinadas de subida y de contenido grande de energía en cada rayo. En teoría, los descargadores pueden proporcionar protección contra descargas directas, pero deben ser utilizados en intervalos muy cercanos (prácticamente todos los postes). La figura 10 muestra las estimaciones de descargas por varias separaciones de descargadores para proteger contra descargas directas. El análisis en la figura 10 se supone que el cable neutro está conectado a tierra en cada poste. El elevado número de descargas disruptivas, según la figura 10, puede ser erróneo cuando el cable neutro no está conectado a tierra excepto

en los postes donde los descargadores se aplican a todas las fases y el nivel de aislamiento de neutro a tierra es alto.



NOTA—La longitud de espacio es 75 m

Figura 10- Eficacia de la separación de pararrayos para protección contra descargas directas

5.3.1 protección de sobretensiones en la fase superior

Si el conductor de la fase superior está situado de tal manera que interceptará todos las descargas de rayo, los descargadores pueden aplicarse a la fase superior que lo hace actuar como un OHGW. Al ser golpeado, el descargador de la fase superior llevará a cabo la descarga a tierra, el circuito estará protegido si la resistencia de tierra del pararrayos es lo suficientemente bajo y el aislamiento de las fases sin protección es lo suficientemente alta. Al igual que un OHGW, se debe tener cuidado para mantener el alto nivel de aislamiento de las fases sin protección. Las curvas para un OHGW (véase la figura 8) se pueden usar para estimar la eficacia de un diseño de descargador de la fase superior. Los descargadores deben utilizarse en prácticamente cada poste o torre para lograr una protección óptima.

5.3.2 Capacidad de absorción de energía en el descargador

Los descargadores de distribución se dividen en tres clasificaciones de energía en la Tabla 3 se muestran estos.

Tabla 3- Clasificación de los pararrayos para el sistema de distribución

Clase de pararrayos	Diámetro del bloque (mm)	Clasificación de energía (kV/kJ MCOV)	Clasificación de energía (J/cm ³)	Tasa de falla por descarga directa en la línea no blindada
Trabajo ligero	25	3.0	170-200	33%–100%
Trabajo normal	32	4.8	170-200	17%–50%
Trabajo pesado	40	6.7	170-200	12%–33%

La clasificación energética en la Tabla 3, son los valores mínimos de los fabricantes para pruebas de descarga de sobretensión de conmutación. De hecho, la mayoría de los bloques de MOV de alta calidad absorben más de 500J/cm³ a la destrucción con producto I^2t constante, independiente de la duración de la sobretension aplicada desde segundos a microsegundos, ver Ringler et al. [B95]. Las estimaciones de la tasa de fracaso para los descargadores de la Tabla 3 son para tres líneas más la línea de neutro sin cable de guarda, teniendo descargadores en todos los postes y cada fase. Para líneas con descargadores sólo en los equipos y / o protecciones de línea con dos o más tramos entre descargadores, la tasa de fracaso del descargador por descarga directa puede ser considerablemente menor. Los descargadores desvían la mayor parte de la corriente a tierra y minimiza la energía. La energía de los descargadores de sobretensiones o terminaciones inducidas en el OHGW es también mucho menor que la terminación directamente en fases y no es la misma consecuencia de una menor tasa de fallo del descargador de estos casos.

Los descargadores de poca potencia se utilizan normalmente sólo en casos especiales para proteger las instalaciones subterráneas. La industria en general utiliza ya sea el normal o descargador de alta resistencia para la protección de las líneas aéreas de distribución. La mayor capacidad de energía de los descargadores de uso industrial mejora su tasa de supervivencia entre 5% - 15% en comparación con descargadores de servicio normal.

En aplicaciones expuestas (por ejemplo, una línea de distribución a la intemperie sin un OHGW), pararrayos de óxido de metal de clase de distribución puede sufrir tasa de fracaso inaceptable debido a los rayos directos. Un porcentaje significativo de rayos directos a descargadores da lugar a energía que excede la capacidad publicada por el fabricante y la onda de prueba de 4/10 μ s de descarga, consulte McDermott et al [B76]. Esto se ve atenuada por el hecho de que los bloques de óxido metálico pueden tener apreciablemente mayor capacidad de absorción de picos de energía que la calificación publicada, ver Ringler et al. [B95]. Otro mecanismo de fallo de algunos diseños de descargador de óxido metálico es la aparición de descargas disruptivas en los alrededores de los bloques cuando el descargador es sometido a eventos de múltiples descargas. Flameos superficiales debido a múltiples descargas son mucho menos probables para descargadores sin separaciones de aire, tales como descargadores con envoltorio de polímero, ver Darveniza et al. [B40]. Diversos estudios, tanto de campo como de laboratorio han evaluado el rendimiento del descargador debido a eventos tanto de una sola descarga y de descargas múltiples, por ejemplo Darveniza et al. [B41], [B42], Fernández et al. [B52], Mata et al. [B73], [B74] y Schoene et al. [B102] y B103]. La energía

disipada en un descargador durante un rayo directo normalmente no es toda la energía del rayo. La mayoría de la carga de la cola de onda y corrientes continuas se comparte con otros descargadores de corrientes cercanos o a tierra a través del propio sistema de distribución. Estudios con rayo cohete-accionado y la interpretación de mediciones directas en utilidades han comprobado que niveles de disipación de alta energía que generalmente superan la calificación de un pararrayos de distribución se producen, pero el 75% de esta energía vino de seguir corrientes de entre tramos, véase Barker et al [B9]. También se sabe que, a pesar de la alta probabilidad de un fallo del pararrayos aislado por un rayo directo, menos fallos de los esperados son reportados debido a descargadores adyacentes que absorben parte de la energía. Descargadores utilizados en protección de la línea rural en alimentadores expuestos con frecuencia ven los niveles de energía que causan fallos.

El descargador de sobretensiones no tiende a estar situado cerca de la descarga, pero no es siempre más cerca de la terminación en el conductor expuesto. Normalmente, un único descargador fallará eléctricamente, dejando intactos los otros, pero varios fallos de descargadores de un solo rayo se han encontrado en las pruebas de campo.

Cuando se interpreta sobre la base de un sistema, una tasa alta de fracaso de pararrayos en respuesta a una descarga directa puede no tener impacto significativo en el sistema. Tomando el caso de un circuito de 50 km en distribución de 13.2 kV con una mezcla de alimentadores principales trifásicos y monofásicos laterales, con pararrayos en todos los postes y en todas las fases, habría cerca de 1000 postes y 2000 descargadores. En terreno abierto, esta línea recibiría unos 20 rayos por año en una zona con elevada densidad de descargas como Florida (USA). Esto llevaría al fracaso de dos a siete descargadores de alta resistencia al año. Después de considerar el blindaje del medio ambiente y la reducción de la incidencia de un rayo en climas moderados.

Los descargadores pueden fallar por una variedad de razones, además de la energía excesiva de un rayo, los fallos también pueden ocurrir cuando se exceden los límites de sobretensiones temporales, desde la entrada de humedad a largo plazo o de fallos de los componentes mecánicos. Las líneas aéreas con descargadores tienen que ser vigiladas periódicamente y mantenidas, de lo contrario la actuación del rayo los degradará con el tiempo.

6. Protección subterránea en las líneas de distribución

Para completar, es razonable incluir el uso de cable subterráneo en lugar de la construcción por encima como un método para mejorar la actuación del rayo en una línea de distribución aérea. Este da generalmente un conjunto de problemas de fiabilidad, climas adversos (rayos, viento y hielo) y la interferencia (vegetal y animal), con un conjunto diferente de las preocupaciones relacionadas con el envejecimiento del dieléctrico del cable, y mucho tiempo a encontrar y reparar fallos. En la mayoría de las situaciones, el equilibrio económico favorece la construcción de líneas aéreas.

Los cables enterrados no son inmunes a daños por rayos, ya sea desde el daño por descarga directa o de sobretensiones inducidas

6.1 Daño por descarga directa a cables subterráneos

En 1993, se realizó un experimento en el Camp Blanding, Florida, para estudiar los efectos de los rayos en los sistemas de distribución de energía subterráneos. Los cables fueron de 15kV, cables coaxiales con aislamiento de polietileno entre el conductor central y del protector concéntrico exterior (neutro). Uno de los cables (cable A) tenía una camisa aislante y se colocó en un conducto de PVC, otro (el cable B) tenía una camisa aislante y fue enterrado directamente, y el tercero (cable C) no tenía la chaqueta y fue enterrado directamente. Los tres cables fueron enterrados 5 m de separación a una profundidad de 1 m. Treinta relámpagos fueron provocados, y se inyectó la corriente del rayo en el suelo directamente encima de los cables. Barker y short [B11], [B12] y [B13] reportaron los siguientes resultados del experimento de cables de alimentación subterránea.

- Después de la unión del rayo a tierra, una fracción sustancial de la corriente del rayo desembocaba en el conductor neutro del cable con un 15% -25% del total de la corriente del rayo (medido en el lanzador de cohetes) siendo detectada a 70 m en cualquier dirección desde el punto de impacto
- La mayor tensión medida entre el conductor central y el neutro concéntrico del cable era de 17 kV, que se encuentra por debajo del nivel básico de aislamiento del cable (BIL).
- Tensiones medidas en el secundario del transformador eran hasta 4 kV. Estos podrían representar una amenaza para los aparatos residenciales.

Según Barker y short [B13], el rayo de pruebas disparado fue atraído al cable por ataques de 10 m a cada lado del cable.

6.2 Corrientes y voltajes inducidos en los cables subterráneos

Paolone et al. [B84] midió las corrientes inducidas del orden de 100 A en envolturas de los cables enterrados ubicados 50-200 m de distancia de las fuentes de rayos disparados, lo que sugiere el potencial de impulso de envoltura en la tierra de alrededor de 30 kV para corrientes de origen de 10 kA. El cálculo de corrientes inducidas ha confirmado las mediciones sobre el terreno mediante la adaptación de la Agrawal et al. Modelo [B1] para la iluminación de campo magnético por debajo del nivel, ver Petrache et al. [B85]. En la actualidad, el nivel mínimo de impulso de cable para soportar sobretensiones inducidas por rayos cercanos deben ser de al menos 30 kV y el requisito podrá ser superior a 100 kV cuando se consideran todos los factores.

Anexo A

Ejemplos del uso de la guía

A.1 ejemplo 1 — diseño de cruceta de 13.2 kV

Problema: se está llevando a cabo una revisión de este estándar de clase 13.2 kV, se realiza un diseño de distribución de línea de tres fases (véase la Figura A.1). Se encuentra en una zona de alta descargas, con una densidad de descargas atmosféricas medidas de forma óptica de 4 rayos por km² por año. Aisladores poliméricos fabricados con la norma ANSI C29.18, porcelana con pasadores aisladores. Se supone que las abrazaderas de cruceta están conectadas y se utilizan pasadores de aisladores de acero. Cables de retención tienen aisladores polimericos-line post PL0150H11. El tamaño del poste estándar es de 12 m con una profundidad de siembra de 1.8 m. El objetivo es estimar el nivel de riesgo al cual es sometido el diseño actual frente a rayos e investigar mejoras.

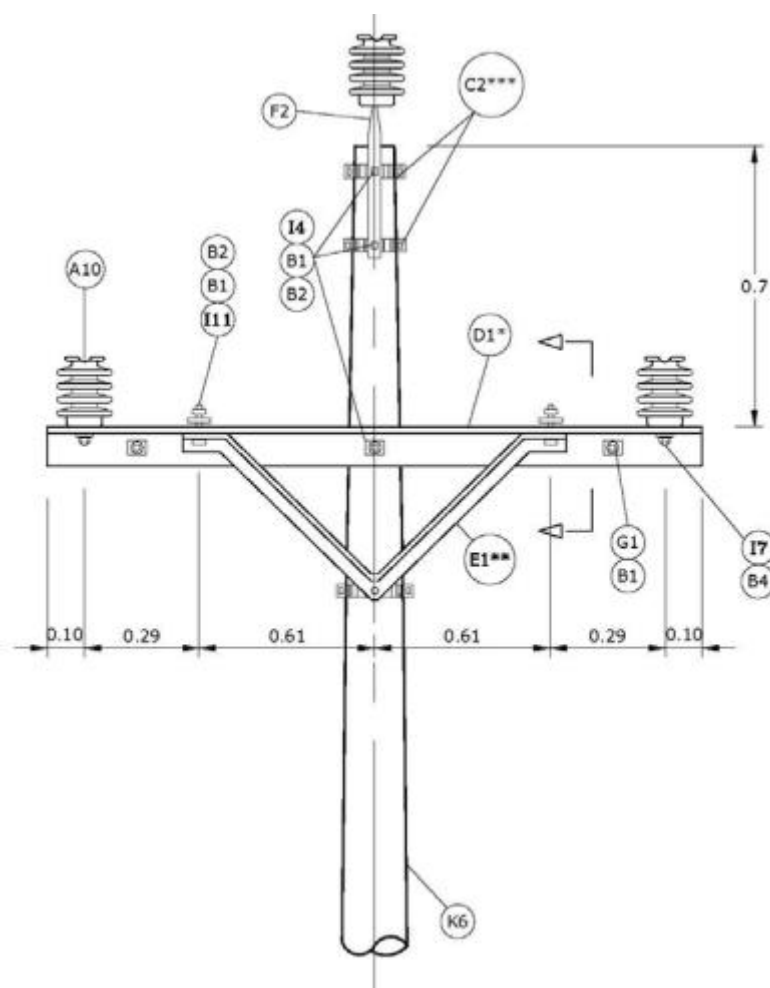


Figura A.1- Diseño de cruceta de clase de 15 Kv

Nivel de aislamiento. El CFO de varios caminos posibles del rayo se muestra en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Cálculos de CFO para varios caminos posibles de descarga disruptiva para el diseño de postes de 13.2 kV en la figura A.1

Desde	A	Camino del rayo	Total CFO
Fase media	Templete	Aislador (150KV) a 1.075 m, poste de concreto (0KV), aislador tensor (0 KV)	150
Fase externa	Templete	Aislador (150KV) a 0.9 m, cruceta metálica (0 KV), poste de concreto (0 KV), aislador tensor (0 KV)	150
Fase derecha	Fase media	Aislador (150KV) a 0.9 m, cruceta metálica (0 KV), segundo aislador (67.5 KV)	217.5
Fase derecha	Fase media	Aire (0.9m)	540

Descargas directas. El GFD puede ser estimado a partir del N_T densidad óptica transitoria, de la ecuación (2)

$$N_g = \frac{4}{3} = 1.33333 \text{ Rayos/Km}^2/\text{año}$$

Para este caso la altura del conductor superior es de 10.575 m con una anchura de 2 m en la estructura. De la ecuación (6), el número de rayos directos en campo abierto es:

$$N = \frac{1.33333[28 \times (10.575)^{0.6} + 2]}{10} = 15.63 \text{ Rayos/100Km/año}$$

Suponiendo un factor de 0,2 de blindaje por objetos cercanos y que todas las descargas directas causarían una descarga disruptiva, el número estimado de flameo por descargas directas será según la ecuación (7):

$$N_S = 12.509 \text{ Flameo/100Km/año}$$

Flameo inducido. El número de descargas disruptivas inducidas en terreno abierto puede estimarse a partir de la figura 5 utilizando la ruta CFO más bajo de 150 kV, para la curva se supone una conductividad moderada de $\sigma = 10 \text{ mS / m}$, la escala por el GFD:

$$\text{Flameo inducido (campo abierto)} = (1.33333) 0.2 \text{ rayos} / 100 \text{ km} / \text{año} = 0.26666 \text{ flameo} / 100 \text{ km} / \text{año}$$

Debido a que gran parte de la línea de distribución está expuesta a descargas de magnitudes grandes que pueden terminar cerca de la línea, sin golpear directamente la línea de distribución, Causando más descargas disruptivas inducidas. El número de descargas disruptivas de tensión inducida debe estar en algún lugar entre el número de descargas disruptivas inducidas en terreno abierto (0.26666 flameos/ 100 km/ año, en este caso) y el número de descargas directas en terreno abierto (12.509 flameos/ 100 km/ año en este caso). Como una estimación, supondremos que las rupturas de tensión inducidas son dos veces las descargas disruptivas inducidas en campo abierto

$$\text{Flameo inducidos} = 0.53332 \text{ flameos} / 100 \text{ km} / \text{año}$$

Todas las descargas disruptivas son asumidas como causa de fallos, como se muestra por:

$$\text{Total fallas} = \text{directas} + \text{inducidas} = 13.0423 \text{ fallas} / 100 \text{ km} / \text{año}$$

Opciones de mejora a tener en cuenta. Se ha decidido considerar los cambios que son relativamente baratos y fáciles de implementar. Cambios de aislamiento para reducir la tensión inducida por descargas disruptivas son la principal consideración con el objetivo de un CFO de 300 kV.

Otros diseños de estructura deben ser examinados. Las opciones de mejora pueden entonces ser comparadas con el costo del diseño existente contra la mejora en la fiabilidad del servicio y la calidad de la energía.

Ejemplo A.2 2línea de distribución-33 kV con un OHGW

Problema: se está considerando utilizar un diseño de línea de distribución protegida para su sistema de 33 kV de cuatro conductores multi conectados con tierra neutro (véase la Figura A.2). La línea se construirá en un área con un factor de blindaje de 0,1 proporcionada por objetos cercanos y una densidad de descargas de tierra 4 rayos por km² por año. El diseño proporciona un ángulo de apantallamiento de 24 °. Los aisladores de fase son ANSI clase 56-3, aisladores tipo porcelana sobre soportes de acero. El OHGW se apoya en una clase ANSI-55-5, porcelana de tipo pin aislante. La línea de distribución utiliza postes de 15 m, y cada poste está conectado a tierra con una resistencia de tierra de 200 Ω o menos.

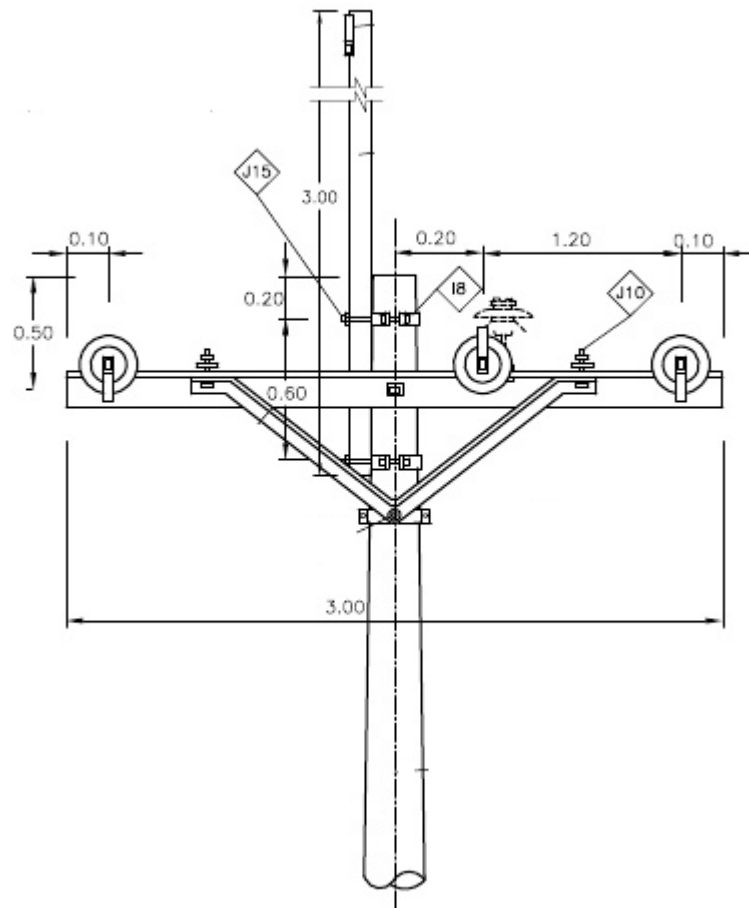


Figura A.2- Diseño de cruceta de clase de 33 Kv

Tabla A.2- CFOs de aislamiento para la línea de 33 kV en la figura A.2

Desde	A	Camino del rayo	Total CFO (KV)
Cable de tierra	A,B,C	Aislador pin de fase (sin conexión con el cable de tierra)	210
Aislador del cable guarda	A,C	Aislador pin de fase (200KV) a 1.4m, cruceta(0 KV) , poste (0 KV) , aislador del OHGW (54 KV)	254
Aislador del cable guarda	B	Aislador pin de fase (200KV) de 0.2 m, cruceta(0 KV), del poste (0 KV), aislador del OHGW (54 KV)	254
A	B	Primer aislador (200) de 1.2 m, cruceta (0KV), segundo aislador (90 KV)	290
Puesta a tierra del poste	A,C	Aislador pin (200KV) de 1.4 m, cruceta (0) a 0.6 m, del poste (0)	200
Puesta a tierra del poste	B	Aislador pin (200KV) a 0.2 m, cruceta (0) a 0.6 m del poste (0)	200

A partir de los cálculos del CFO, es obvio que se necesitan los separadores de fibra de vidrio. Sin los separadores, el CFO sería de 200 kV, lo que llevaría a descargas disruptivas de tensión inducida, y el OHGW no sería eficaz en la prevención de descargas disruptivas por descargas directas. Los caminos de mayor preocupación son los caminos de descarga de fase a tierra. El camino más bajo de descargas de fase a tierra es de 200 kV desde la fase B a la toma de tierra del poste

$$N_g = 1.33333 \text{ Rayos/Km}^2/\text{año}$$

La altura de toma de tierra de arriba es 13.1 m y la anchura de la cruceta es de 3 m. De la ecuación (6), el número de rayos directos en campo abierto es:

$$N = \frac{1.33333 \left[28 \times (13.1)^{0.6} + 3 \right]}{10} = 17.87 \text{ Rayos/100Km/año}$$

El número estimado de destellos utilizando un factor de protección 0.1 es:

Descargas directas a la línea de distribución (N_s)=16.089 rayos/100 km/año

Debido a que la línea de distribución está conectada a tierra en cada poste y el ángulo de apantallamiento es inferior a 45 °, todas las descargas a la línea de distribución se suponen que golpean el OHGW. El número de descargas disruptivas se puede determinar usando el porcentaje de descargas directas causando descargas disruptivas (80%) a partir de la figura 8 con una resistencia de tierra de 200 Ω para la curva CFO 200 kV y la distribución de la primera corriente de descarga de retorno de la Tabla 1.

Flameo por descargas directas = 16.089 destellos / 100 km / año) (0,8) = 12.87 flameos / 100 km / año

Flameo inducido. El número de descargas disruptivas inducidas en terreno abierto puede estimarse a partir de la figura 5 utilizando la ruta CFO más bajo de 200 kV, para la curva se supone una conductividad moderada de $\sigma = 10 \text{ mS / m}$, la escala por el GFD:

Flameo inducido (campo abierto) = (1.33333) 0.3 rayos / 100 km / año = 0.39999 flameo/ 100 km / año

Debido a que gran parte de la línea de distribución está expuesta a descargas de magnitudes grandes que pueden terminar cerca de la línea, sin golpear directamente la línea de distribución, Causando más descargas disruptivas inducidas. El número de descargas disruptivas de tensión inducida debe estar en algún lugar entre el número de descargas disruptivas inducidas en terreno abierto (0.39999 flameos/ 100 km/ año, en

este caso) y el número de descargas directas en terreno abierto (12.87 flameos/ 100 km/ año / año en este caso). Como una estimación, supondremos que las rupturas de tensión inducidas son dos veces las descargas disruptivas inducidas en campo abierto

Flameo inducido=0.8 flameo/100km/año

En algunas ocasiones el CFO están grande que puede superar el eje horizontal en la figura 5, de tal forma puede suponerse que la estructura es inmune a las descargas disruptivas de tensión inducida ya que esta será muy baja, a pesar de la alta conductividad que es inferior a 10 mS / m. Todas las descargas disruptivas son entonces debido a descargas directas y todas descargas disruptivas se suponen que causan fallos.

Fallas totales = directas + inducidas= (12.87+ 0.8)= 13.67 fallas / 100 km / año

Una opción a considerar de mejora sería el uso de soportes de fibra de vidrio de aisladores en lugar de los soportes de acero especificados. Esto aumentaría el CFO de la fase a fase y el CFO de fase a tierra.

Cuando se compara este diseño con diseños no blindados, el aumento en el costo de construcción debe ponderarse contra el costo mitigado en las interrupciones de energía causadas por descargas atmosféricas.

6. Bibliografía

- [B1] Agrawal, A.K., Price, H.J., and Gurbaxani, S.H., "Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-22, pp. 119-129, May 1980.
- [B2] AIEE Committee Report, "A Method of Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 69, pp. 1187-1196, 1950.
- [B3] AIEE Committee Report, "Impulse Flashovers of Combinations of Line Insulators, Air Gaps, and Wood Structural Members," AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 75, pp. 16-21, 1956.
- [B4] Anderson, J.G. Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above. Palo Alto, CA: EPRI..1982. Pp 545-597
- [B5] Anderson, R. B. and Eriksson, A.J., "Lightning Parameters for Engineering Application," Electra, no. 69, pp. 65-101, March 1980.
- [B6] Anderson, R.B., Eriksson, A.J., Kroninger, H., Meal, D. V., and Smith, M.A., "Lightning and Thunderstorm Parameters," IEE Conference Publication no. 236, Lightning and Power Systems, London, June 1984, pp. 57-61.
- [B7] Armstrong, H.R., Stoelting, H. O., and Veverka, E. F., "Impulse Studies on Distribution Line Construction," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, no. 2, Feb. 1967.
- [B8] Baba, Y. and Rakov, V.A., "Voltages Induced on an Overhead Wire by Lightning Strikes to a Close Tall Grounded Object," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 48, no. 1, pp. 212-214, Feb. 2006.
- [B9] Barker, P., Manaco, R., Kvaltine, D. and Parrish, D., "Characteristics of Lightning Surges Measured at Metal Oxide Distribution Arresters," IEEE Transactions on Power Delivery vol. 8, no. 1, pp. 301-310, Jan. 1993.
- [B10] Barker, P. P., Short, T.A., Eybert-Berard, A. R., and Berlandis, J.P., "Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, pp. 980-995, Apr. 1996.
- [B11] Barker, P. P., and Short, T. A., "Lightning Effects Studied: The Underground Cable Program." Transmission and Distribution World, vol. 48, no. 5, pp. 24-33, May 1996.
- [B12] Barker, P. P., and Short, T. A. "Lightning Measurements Lead to Improved Understanding of Lightning Problems on Utility Power Systems," Proceedings of 11th CEPSI, 1996, Kuala Lumpur, Malaysia, vol. 2, pp. 74-83.
- [B13] Barker, P., and Short, T. A. "Findings of Recent Experiments Involving Natural and Triggered Lightning." 1996 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Los Angeles, California, September 16-20, 1996.
- [B14] Boccippio, D., Cummins, KL, Christian, HJ and Goodman, SJ, "Combined Satellite and Surface-Based Estimation of the Intracloud-Cloud-to-Ground Lightning Ratio over the Continental United States," Monthly Weather Review , Vol. 129, pp. 108-122, January 2001.

- [B15] Bodle, D.W., Ghazi, A.J., Syed, M., and Woodside, R.L., Characterization of the Electrical Environment, Toronto and Buffalo, University of Toronto Press. Pp. 14-15, 85-95, 124-130.
- [B16] Borghetti, A., and Nucci, C.A., "Estimation of the Frequency Distribution of Lightning-induced Voltages on an Overhead Line Above a Lossy Ground: Sensitivity Analysis," Proc. 24th Int. Conf. On Lightning Protection, pp. 306-313, Birmingham, UK, September 14-18, 1998.
- [B17] Borghetti, A., Nucci, C.A., Paolone, M., Bernardi, M., "Effect of the Lateral Distance Expression and the Presence of Shielding Wires on the Evaluation of the Number of Lightning Induced Voltages," Proc. ICLP 2000, 25th International conference on lightning protection, Rhodes, September 18-22, 2000.
- [B18] Borghetti, A., Nucci, C.A., Paolone, M., "Lightning Performance of Distribution Lines: Sensitivity to Computational Methods and Data," Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 796-798 vol. 2, 2001.
- [B19] Borghetti, A., Nucci, C.A., Paolone, M., "Statistical Evaluation of Lightning Performances of Distribution Lines," Proc. 5th Int. Conf. On Power System Transients, Rio de Janeiro, June 2001.
- [B20] Borghetti, A., Nucci, C.A. and Paolone, M., "Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 3, pp. 1400-1409, July 2004.
- [B21] Borghetti, A., Nucci, CA, Paolone, M., Bernardi, M., Malgarotti, S., Mastandrea, Mastandrea, I., "Influence of arrest arresters on the statistical evaluation of lightning performance of distribution lines," Proc. Of International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 12-16 Sept. 2004.
- [B22] Borghetti, A., Nucci, C.A., Paolone, M., "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and its Comparison with the IEEE Std 1410 Method," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 684-692, Jan 2007.
- [B23] Byerley, III, LG, Cummins, KL, Tuel, J., Hagberg, Jr., D. J, Bush, W., "The Measurement and Use of Lightning Ground Flash Density," Intl. Aerospace & Ground Conference On Lightning and Static Electricity, Williamsburg, VA, Sept. 26-28, 1995.
- [B24] Christian, HJ, Blakeslee, RJ, Boccippio, DJ, Boeck, WL, Buechler, DE, Driscoll, KT, Goodman, SJ, Hall, JM, Koshak, WJ, Mach, DM and Stewart, MF, "Global frequency And distribution of lightning as observed from space by Optical Transient Detector," Journal of Geophysical Research vol. 108, no. D1, pp. ACL 4 1-15, 2003.
- [B25] Cherney, E.A., Reichman, J., Stonkus, D.J., and Gill, B.E., "Evaluation and Application of Dead Polymeric Insulators to Distribution," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 103, pp. 121-132, 1984.
- [B26] Chowdhuri, P., "Estimation of Flashover Rates of Overhead Power Distribution Lines by Lightning Strokes to Further Ground," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 3, pp. 1982-1989, July 1989.
- [B27] CIGRÉ Working Group 33.01, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRÉ Technical Brochure no. 63, October 1991.
- [B28] CIGRÉ Working Group 33.01.02 (De la Rosa, F., Cummins, K., Dellera, L., Diendorfer, G., Galván, A., Huse, J., Larsen, V., Nucci, CA , Rachidi, F., Rakov, V., Torres, H. and Uman, MA), Characterization of lightning for applications in electric power systems, CIGRÉ Technical Brochure 172, December 2000.

- [B29] CIGRÉ Task Force C4.01.02-B, Torres, H. (chair), "Ground Flash Density: definition of the appropriate grid size and a relationship proposal Ng. Td for Tropical zones," Activity Report, CIGRE WG C4.01 Meeting, Dallas, Texas, Sept. 2003.
- [B30] CIGRÉ Working Group C4.401, "Lightning induced voltages on overhead power lines. Part III: Sensitivity Analysis," WG C4.401, *Electra*, pp. 27-30, October, 2005.
- [B31] Clayton, J. M., and Shankle, D.F., "Insulation Characteristics of Wood and Suspension Insulators in Series," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 74, pp. 1305-1312, 1955.
- [B32] Cooray V., "Horizontal fields generated by return strokes," *Radio Science*, vol. 27, no. 4, pp. 529-537, July-August 1992.
- [B33] Cooray, V., "Calculating Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: A Comparison of Two Coupling Models," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 3, pp. 179-182. Aug 1994.
- [B34] Cooray, V., "Some consideration on the 'Cooray-Rubinstein' approximation used in deriving the horizontal electric field over finitely conducting ground," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 4, pp. 560-566, Nov 2002.
- [B35] Cummins, K.L., Krider, E. P., and Malone, M.D., "The U.S. National Lightning Detection Network and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, no. 4, pp. 465-480, Nov. 1998.
- [B36] Darveniza H., Holcombe B.C., and Stillman, R.H., "An Improved Method for Calculating the Impulse Strength of Wood Porcelain Insulators," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 98, pp. 1909-1915, 1979.
- [B37] Darveniza, M., *Electrical Properties of Wood and Line Design*. St. Lucia, Queensland: University of Queensland Press, 1980.
- [B38] Darveniza, M., Limbourn, G. J., and Prentice, S.A., "Line Design and Electrical Properties of Wood," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, no. 11, Nov. 1967.
- [B39] Darveniza, M., Roby, D., and Tumma, L. R., "Laboratory and Analytical Studies of the Effects of Multipulse Lightning Current on Metal Oxide Arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 764-771, Apr. 1994.
- [B40] Darveniza, M., Tumma, L.R., Richter, B., and Roby, D.A., "Multiple-Stroke Lightning and Zinc Oxides Arresters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no.3, pp. 1168-1175, Jul. 1997.
- [B41] Darveniza, and M., Saha, T. K., "Surface Flashover on Metal-oxide Varistor Blocks," in *Proc. Of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, pp. 406-409, Jun 1998.
- [B42] Darveniza, M., Saha, T. K., and Wright, S., "Comparisons of In-service and Laboratory Failure Modes of Metal Oxidation Arresters," in *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore*, pp. 2093-2100, Jan. 2000.
- [B43] Darveniza, M., "A practical extension of Rusck's formula for maximum lightning induced voltage that accounts for ground resistivity," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD 22, no. 1 pp 605-612, Jan 2007.
- [B44] De la Rosa, F., "Assessing the Operation of Distribution Lines in a Lightning Environment," *Proceedings of the IASTED International Symposium on High Technology in Power Industry*, Bozeman, Montana, pp. 316-319, Aug. 20-22, 1986.

[B45] De la Rosa, F., Nucci, CA, and Rakov, V., "Lightning and Its Impact on Power Systems," CIGRE International Conference on Insulation Coordination for Electricity Development in Central European Countries, September 9-12, 1998 , Paper, pp.24 and 44.

[B46] De la Rosa, F., "Effects of Close Lightning on Electric Power Distribution Lines," Ph.D., Uppsala University, 1985.

[B47] Elrod, J.W., and Menzel, H. G., "Use of Polymer / Composite Insulators in Construction, Maintenance and Temporary Procedures," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 1521-1524, 1981.

[B48] EPRI Project 2542-1 Report TR-100218, "Characteristics of Lightning Surges on Distribution Lines," 1991.

[B49] Eriksson, A.J., "The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, no. 2, pp. 859-870, July 1987.

[B50] Eriksson, A.J., Stringfellow, M.F., and Meal, D.V., "Lightning Induced Overvoltage on Overhead Distribution Lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 4, Apr. 1982.

[B51] Gary, C., "Approach completeness of multifilament propagation in haute frequence par l'utilisation of complex matrices," EDF Bull. Direction Etude Recherches B, no. 3/4, pp. 5-20, 1976.

[B52] Fernandez, M. I., Rambo, K.J., Rakov, V.A., and Uman, M.A., "Performance of MOV Arresters during Very Close Direct Lightning Strikes to a Power Distribution System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 2, pp. 411-418, Apr. 1999.

[B53] Fernandez, MI, Rambo, MV, Stapleton, VA, Rakov, VA, and Uman, MA, "Review of Triggered Lightning Experiments Performed on a Power Distribution System at Camp Blanding, Florida during 1996 and 1997, Proceedings of The 24th International Conference on Lightning Protection, pp. 29-35, Sept. 1998.

[B54] Fernandez, MI, Rakov, VA, and Uman, MA, "Transient Currents and Voltages in a Power Distribution System due to Natural Lightning," Proceedings of the 1999 IEEE / PES Transmission and Distribution Conference, April 11-17, 1999 , Paper TD 319.

[B55] Guerrieri, S., Nucci, C.A., Rachidi, F., Rubinstein, M., "On the Influence of Elevated Strike Objects on Directly Measured and Indirectly Estimated Lightning Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 4, pp. 1543-1555, Oct. 1998.

[B56] Guerrieri, S., Nucci, CA, Rachidi, F., "Influence of the Ground Resistivity on the Polarity and Intensity of Lightning Induced Voltages," Proceedings of 10th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Montreal, August 24-30, 1997.

[B57] Grzybowski, S., and Jacob, P.B., "The Steep-Front, Short-Duration Pulse Characteristics of Distribution Insulators with Wood," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, no. 3, pp. 1608-1616, July 1990.

[B58] Grzybowski, S., and Jenkins, E. G., "AC and Lightning Performance of Fiberglass Crossings Aged in 115 kV Transmission Line," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 4, pp. 1914-1920, Oct.1993.

[B59] Grzybowski, S. and Li, X., "Added CFO Voltage by the Fiberglass Distribution Line Pole," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 4, pp. 958-963, April 2005.

[B60] Idone, V. P., Orville, R.E., "Lightning Return Stroke Velocities in the Thunderstorm Research International Program," Journal of Geophysical Research, vol. 87, pp. 4903-4915, 1982.

- [B61] IEEE Working Group Report, "Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines," IEEE Transactions on Power Delivery vol. 5, no. 3, pp. 1408-1417, July 1990.
- [B62] IEEE Working Group Report: "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II- Updates to Analytical Models," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267, Jul.1993.
- [B63] IEEE Fast Front Transients Task Force, "Modeling guidelines for fast front transients," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 493-506, Jan. 1996.
- [B64] IEEE Std 998™ - 1996, IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations.
- [B65] Ishii, M., Michishita, K., Hongo, Y., and Ogume, YS, "Lightning-induced Voltage on an Overhead Wire Dependent on Ground Conductivity," IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9, no. 1, Jan. 1994.
- [B66] Jacob, P.B., Grzybowski, S., Libby, L. and Barsley, P. K, "Experimental Studies of Critical Flashover Voltage on Distribution Line Construction," IASTED, International Journal on Energy Systems, no. 1, pp. 30-34, 1991.
- [B67] Jacob, P.B., Grzybowski, S., and Ross, E. R., "An Estimation of Lightning Insulation Level of Overhead Distribution Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, no. 1, pp. 384-390, Jan. 1991.
- [B68] LIOV Code, free version, <http://www.liov.ing.unibo.it/>.
- [B69] MacGorman, D.R., Maier, M.W., and Rust, W.D., "Lightning Strike Density for the Contiguous United States from Thunderstorm Duration Records," Report to U.S. Nuclear Regulatory Commission, # NUREG / CR-3759, 1984.
- [B70] Master, M. J. and Uman, M.A., "Transient electric and magnetic fields associated with establishing finite electrostatic dipole," American Journal of Physics, no. 51, pp. 118-126, 1983.
- [B71] Master, M. J., and Uman, M.A., "Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 103, no. 9, pp. 2502-2518, Sep. 1984.
- [B72] Master, M.J., Uman, M.A., Beasley, W. and Darveniza, M. "Lightning Induced Voltages on Power Lines: Experiment," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 103, no. 9, pp. 2519-2529, Sep. 1984.
- [B73] Mata, C. T., Fernandez, M. I., Rakov, V.A., and Uman, M.A., "EMTP Modeling of Triggered Lightning to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1175-1181, 2000.
- [B74] Mata, CT, Rakov, VA, Rambo, KJ, Diaz, P., Rey, R. and Uman, MA, "Measurement of the Division of Lightning Return Stroke Current Among the Multiple Arresters and Grounds of a Power Distribution System , "IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1203-1208, 2003.
- [B75] McDaniel, J., "Line Arrester Application Field Study," Proceedings of IEEE / PES Transmission and Distribution Conference, Nov. 2001.
- [B76] McDermott, T. E., Short, T. A., and Anderson, J. G., "Lightning Protection of Distribution Lines," IEEE Transactions of Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 138-152, Jan. 1994.
- [B77] Mousa, A. M., "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 3, pp. 1669-1677, July 1994.
- [B78] NOAA Ground Flash Density Map, <http://www.crh.noaa.gov/lmang/lx/wcm/>

08_Vaisala_NLDN_Poster.pdf.

[B79] Nucci, C.A., Mazzetti, C. Rachidi, F., and Ianoz, M., "On lightning return stroke models for LEMP calculations," 19th International Conference on Lightning Protection, Graz / Austria 1988.

[B80] Nucci, CA, Cigré Working Group 33.01 (Lightning), "Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part I: Return-Stroke Current Models with Specified Channel-Base Current for the Evaluation of the Return-Stroke Electromagnetic Fields," *Electra*, no. 161, pp. 75-102, Aug. 1995.

[B81] Nucci, C.A., Cigré Working Group 33.01 (Lightning), "Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part II: Coupling Models for the Evaluation of Induced Voltages," *Electra*, no. 162, pp. 121-145, Oct. 1995.

[B82] Nucci, C.A., Rachidi, F., Ianoz, M., and Mazzetti, C. "Lightning Induced Voltages on Overhead Lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, no. 1, pp. 75-86, Feb. 1993, correction published in no. 4, p. 488, Nov. 1993.

[B83] Nucci, CA, and Rachidi, F., "Interaction of electromagnetic fields with electrical networks generated by lightning," Chapter 8 of *The Lightning Flash: Physical and Engineering Aspects*, London: 2003.

[B84] Paolone, M., Nucci, CA, Rachidi, F., Petrache, E., "Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 423-431, Jan. 2004.

[B85] Paolone, M., Schoene, Uman, M., Rakov, V., Jordan, D., Rambo, K., Jerauld, J., Nucci, CA, Borghetti, A., Rachidi, F., Petrache, E., "Testing of the LIOV-EMTP96 Code for Computing Lightning Induced Currents on Real Distribution Lines: Triggered Lightning Experiments, Proc. Of 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 13-16 Sept. 2004.

[B86] Paolone, M., Petrache, E., Rachidi, Nucci, CA, Rakov, V., Uman, M., Jordan, D., Rambo, K., Jerauld, J., Nyffeler, M. and Schoene, J., "Lightning Induced Disturbances in Buried Cables - Part II: Experiment and Model Validation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* vol. 47, no. 3, pp. 509-520, Aug. 2005

[B87] Petrache, E., Rachidi, F., Paolone, M., Nucci, CA, Rakov, V. and Uman, M., "Lightning Induced Disturbances in Buried Cables - Part I: Theory," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* vol. 47, no. 3, pp. 498-508, Aug. 2005.

[B88] Piantini, A., Janiszewski, JM, Borghetti, A., Nucci, CA and Paolone, M., "The Scale Model for the Study of the LEMP Response of Complex Power Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, no. 1, pp. 710-720, Jan 2007.

[B89] Pigini, A., Sartorio, G., Moreno, M., Ramírez, M., Cortina, R. and Garbagnati, E., "Influence of Air Density on Impulse Strength of External Insulation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, pp. 2888-2900, Oct. 1985.

[B90] Powell, R.W., Thwaites, H. L., and Stys, R. D. "Estimating Lightning Performance of Spacer-Cable Systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, pp. 315-319, Apr. 1965.

[B91] Rachidi, F., Nucci, C.A., Ianoz, Mazzetti, C., "Influence of a Lossy Ground on Lightning-induced Voltages on Overhead Lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 3, pp. 250-264, Aug. 1996.

[B92] Rachidi, F., Nucci, C.A., Ianoz, M., "Transient analysis of multiconductor lines above ground," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 1, pp. 294-302, Jan.

[B93] Rakov, VA, Uman, MA, Fernandez, CT, Mata, CT, Rambo, KJ, Stapleton, MV, and Sutil, RR, "Direct Lightning Strikes to the Lightning Protective System of a Residential Building: Triggered-Lightning Experiments , "IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17 no. 2, pp 575-586, April

2002.

[B94] Rakov, V.A., Mata, C.T., Uman, M.A., Rambo, K.J. and Mata, A.G., "Review of Triggered Experiments at the ICLRT at Camp Blanding, Florida," in Proc. Of 5th IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, Paper 381, 8 pp. June. 2003.

[B95] Ringler, KG, Kirkby, P., Erven, CC, Lat, MV, and Malkiewicz, TA, "The Energy Absorption Capability and Time-to-Failure of Varistors Used in Station-Class Metal-Oxide Surge Arresters," IEEE Transactions on Power Delivery vol. 12, no. 1, pp. 203-212, Jan. 1997.

[B96] Rizk, F.A., "Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures, Part I: Theory," and "Part II: Application," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 162-193, Jan. 1994.

[B97] Ross, E. R., and Grzybowski, S., "Application of the Extended CFO-Added Method to Overhead Distribution Configurations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1573-1578, Oct.1991.

[B98] Ross, P.M. "Burning of Wood Structures by Leakage Currents," AIEE Transactions, vol. 66, pp.279-287, 1947.

[B99] Rubinstein, M., "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning to close, intermediate, and long range," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,

Vol. 38, no. 3, pp. 531-535, Aug. 1996.

[B100] Rusck, S., "Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks," Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, no. 120, 1958.

[B101] Rusck, S., "Protection of Distribution Lines," in Lightning, R. H. Golde, ed., London: Academic Press, 1977.

[B102] Schoene, J., Uman, MA, Rakov, VA, Mata, CT, Mata, KJ, Rambo, J., Jerauld, J., Jordan, DM and Schnetzer, GH, "Direct Lightning Strikes to Test Power Distribution Lines - Part I: Experiment and Overall Results, "IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2245-2253, Oct. 2007

[B103] Schoene, J., Uman, MA, Rakov, VA, Mata, CT, Mata, KJ, Rambo, J., Jerauld, J., Jordan, DM and Schnetzer, GH, "Direct Lightning Strikes to Test Power Distribution Lines - Part II: Measured and Modeled Current Division Among Multiple Arresters and Grounds, "IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2245-2253, Oct. 2007.

[B104] Short, T. A., and Ammon, R. H., "Monitoring Results of the Effectiveness of Surge Arrester Spacing on Distribution Line Protection," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14 pp. 1142-1150, July 1999.

[B105] Short, T. A., communication to IEEE WG on the Lightning Performance of Distribution Lines, 2001.

[B106] Shwehdi, M. H., "Investigation and Analysis of Lightning Impulses of Multiple Dielectrics Used in Electrical Distribution Systems," Ph.D. Thesis, Mississippi State University, 1985.

[B107] Shwehdi, MH, and El-Kieb, AA, "Lightning Critical Flashover (CFO) of Multiple Dielectrics Series Used on Distribution Systems," IASTED Proceedings, PowerHigh Tech'89, pp. 653-657, July 4-7, 1989 , Valencia, Spain.

- [B108] Shwehdi, MH and El-Hadri, M. "What Polymers and Fiberglass Reinforced Plastics (FRP) May Add to Classical Primary Insulation," 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 5-8, 1994, Pittsburgh, PA. , USES
- [B109] Shwehdi, M. H. "Advantages of Polymer and FRP Insulators Over Wood and Porcelain on Power Distribution Structures," Paper # 248-026, IASTED on High Tech'96, Banff, Canada, June 1996.
- [B110] Takami, J. and Okabe, S., "Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol 22, no 1, pp. 547-556, Jan. 2007.
- [B111] Uman, M.A., McLain, D.K. and Krider, E.P., "The electromagnetic radiation from a finite antenna," American Journal of Physics, vol. 43, pp. 33-38, Jan. 1975.
- [B112] US Department of Agriculture Rural Utilities Service (RUS), "Specifications and Drawings for 12.47 / 7.2-kV Line Construction," RUS Bulletin 1728F-804, available at www.usda.gov/rus/electric/bulletins.htm.
- [B113] Wagner, C. F. and Mc Cann, G. D., "Induced Voltages on Transmission Lines," AIEE Transactions, vol. 61, pp. 916-930, 1942.
- [B114] Yokoyama S., "Calculation of lightning-induced voltages on overhead multiconductor systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, pp. 100-108, Jan. 1984.
- [B115] Yokoyama, S. Miyake, K., Mitani, H., and Yamazaki, N., "Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1, no.2, pp. 129-139, April 1986.
- [B116] Zessin, W. N. and McDaniel, J. "Long Term Analysis of Line Arrester Application Field Study," Proceedings of 2008 IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Expo, pp. 1-6, April 2008.
- [B117] IEEE Power & Energy Society. "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines" IEEE Std 1410-2010, 30 September 2010.